

## **Sistema de Gestão de Energia e Ativação de uma Espoleta Eletrónica**

Ana Carolina Apolinário dos Santos Mesquita

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientadores: Professor Doutor António Carlos de Campos Simões Baptista  
Professor Doutor Pedro Nuno Mendonça dos Santos

### **Júri**

Presidente: Professor Doutor Gonçalo Nuno Gomes Tavares

Orientador: Professor Doutor Pedro Nuno Mendonça dos Santos

Vogal: Professora Doutora Maria Beatriz Mendes Batalha Vieira Vieira Borges

**Novembro 2015**



# Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “**FIREND - Projétil de artilharia para o combate de incêndios**” parcialmente suportado pelo Centro de Investigação da Academia Militar / Estado Maior do Exército e pela Direção-Geral de Recursos da Defesa Nacional / Ministério da Defesa Nacional.

Com este texto pretendo agradecer a todos os que contribuíram e me ajudaram a concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor António Batista agradeço a disponibilidade e ao meu coorientador, Professor Doutor Pedro Santos, um profundo agradecimento pelas sugestões e por toda a assistência na resolução dos problemas que surgiram ao longo deste percurso.

À Professora Doutora Beatriz Vieira Borges por disponibilizar o laboratório que permitiu desenvolver o projecto desde a sua fase inicial.

Agradeço ao meu Diretor de Curso, o Tenente Coronel de Material António Martins, pela dedicação aos alunos de Serviço de Material.

Um grande obrigado aos meus amigos, civis e militares, por todas as vivências e por toda a motivação.

Por fim à minha família e amigos um agradecimento especial pelo apoio e incentivo permanente.



# Resumo

Os incêndios florestais constituem uma realidade que pode ser minimizada com o auxílio Forças Armadas, através de homens e de meios. O Projeto FIREND®, no qual este trabalho está inserido, tem como objetivo projetar uma munição que ao libertar uma substância química sobre o fogo, o impeça de se expandir e se possível, o extinga. O projétil tem 155mm de calibre e o seu compartimento de carga terá cerca de  $7,5dm^3$ , permitindo uma área de atuação com cerca de  $75m^2$ . Face aos elevados custos do combate aéreo e à limitação imposta pelas condições meteorológicas e de visibilidade para operar os referidos aparelhos, prevê-se que esta munição seja uma vantagem pois permite aceder a zonas de difícil acesso, evitando a exposição de pessoas ao fogo.

Este trabalho foca-se no projeto da espoleta eletrónica, que devido ao carácter do projétil, não deve conter cargas explosivas para o seu acionamento. Propõe-se criar um sistema que ao detetar a aceleração da munição à saída do tubo inicie uma contagem de tempo de voo até ao valor inserido pelo operador do obus, para então ativar o sistema de acionamento da mesma. O projeto foi dividido em duas partes, a primeira constituída pelos blocos referentes ao sensor, gestão de energia e acionamento, e a segunda, que é constituída pelo controlador, bloco de comunicação e controlo do relógio. Neste projeto serão abordados os blocos funcionais referentes à primeira parte e será mostrado o circuito desenvolvido para detetar o momento em que a munição ganha aceleração, constituído por um acelerómetro, condicionamento de sinal, e o sistema de acionamento, baseado num conversor dc-dc elevador de tensão, bem como o circuito qde gestão de potência de toda a espoleta.

Como resultado é apresentado um circuito compatível com o Projeto FIREND®, sendo discutidas ao longo de todo este trabalho as várias hipóteses possíveis para a sua concretização e as vantagens e desvantagens das opções tomadas.

Palavras-chave: Espoleta eletrónica, incêndios, acelerómetro.



# Abstract

Forest fires are incidents that must be dealt with in a rapid manner. The Portuguese Armed Forces intend to further increase their manpower and resources dedicated to the capacity to provide support during emergency situations. The FIREND® Project has the objective to design and develop an artillery ammunition that is able to release fire extinguisher chemical powder over forest fires, preventing them from expanding or even extinguish them. The 155mm projectile developed is compatible with the existing shells used by NATO 155mm artillery and will deliver a payload of 7.5 dm<sup>3</sup> of chemical powder that is deemed effective over a forest fire that is active on a area of 75m<sup>2</sup>. The FIREND® Project ammunition will be able to release the chemical under harsh wind and visibility conditions or over rugged terrain that obstruct or severely constrain the operation of aircrafts used to combat forest fires. Other foreseeable advantages are the reduction of fire combating personnel exposure to fire and the lower cost per utilization when compared with fire combat air assets.

This project intends to discriminate the design of the electronic fuse used by the artillery shell of the FIREND® Project that does not contain any explosive charge. The acceleration at the end of the howitzer tube will initiate the fuse in accordance with the flight time and permitting the deliverance of the chemical powder on the designated area on optimal effectiveness conditions.

Fuse's functional blocks guided this research and development project. The initial efforts were steered towards the block related to the sensors, power management and activation. The design and development of the controller, communications and control clock block were discuss in another project.

The developed circuit is able to detect the ammunition acceleration, activate the fuse and trigger the payload release at an appropriate distance from the soil. The hypotheses considered during the design and development as well the respective logical reasoning that support the selected options are presented throughout this work.

**Keywords:** Eletronic Fuse, fire, accelerometer.





# Índice

Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Acrónimos e Siglas .....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2. Motivação e Enquadramento do Problema .....	1
1.3 Estado da Arte .....	3
1.4 Evolução das Espoletas .....	4
1.5 Projetos com Objetivos Semelhantes .....	6
1.6 Estrutura da dissertação.....	7
2. Projeto FIREND® .....	9
2.1 Parâmetros do Projecto FIREND .....	10
2.1.1 Sensor de Aceleração.....	12
2.1.2 Acionamento da Libertação do Agente Extintor .....	18
2.1.2.1 <i>Exploding foil initiator</i> (EFI) .....	18
2.1.2.2 <i>Exploding bridge wire</i> (EBW).....	19
2.1.2.3 <i>Semiconductor bridges</i> .....	20
2.1.2.4 <i>Laser or plasma detonators</i> .....	20
2.1.2.5 Materiais piezoelétricos .....	21
2.1.3 Gestão de Energia do Sistema .....	23
2.1.3.1 “ <i>Power up</i> ” do circuito .....	24
2.1.3.2 Energia do Acionamento.....	27
3. Sistema Eletrónico Proposto e Resultados .....	29
3.1 Sensor de Aceleração .....	29
3.1.1 Acelerómetro.....	29
3.1.2 Filtro .....	36
3.1.3 Amplificador .....	41
3.1.4 Multivibrador Monoestável.....	43
3.1.4 Funcionamento Global do circuito .....	45
3.2 Gestão de Energia do Sistema.....	47
3.3 Acionamento .....	50

3.4	Análise de custos .....	65
4.	Funcionamento Global do Circuito .....	67
5.	Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros.....	71
2.1.	Conclusões .....	71
2.2.	Propostas de trabalhos futuros .....	72
	<b>Referências.....</b>	<b>73</b>
	Anexo 1 .....	77
	Anexo 2 .....	79
	Anexo 3.....	81

# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Projetos com objetivos semelhantes ao FIREND® .....	6
Tabela 2- Dados da Tabela de Tiro .....	11
Tabela 3 - Especificação dos parâmetros utilizados .....	11
Tabela 4 - Aceleração calculada .....	11
Tabela 5 - Comparação de sensores .....	13
Tabela 6 - Parâmetros dos amplificadores .....	16
Tabela 7 – Parâmetros dos monoestáveis .....	16
Tabela 8 - EFI e EBW .....	21
Tabela 9 - SB .....	22
Tabela 10 - Laser .....	22
Tabela 11 - Comparação dos tipos de baterias .....	25
Tabela 12 - Gamas de alimentação dos integrados .....	26
Tabela 13 - Corrente de alimentação dos integrados .....	26
Tabela 14 - Comparação das pilhas de Níquel Hidreto Metálico .....	27
Tabela 15 - Potência associada a cada processo de acionamento .....	27
Tabela 16 - Características da pilha utilizada no conversor .....	28
Tabela 17 - Relação entre potência e energia da pilha de 12V .....	28
Tabela 18 - Valores dos condensadores da montagem do acelerômetro.....	30
Tabela 19 - Largura de banda dos eixos do acelerômetro .....	30
Tabela 20 - Máximos obtidos com a experiência do pêndulo .....	34
Tabela 21 - Valor dos componentes do amplificador .....	41
Tabela 22- Características do buffer TLE2426.....	48
Tabela 23 - Características do IRF530 .....	51
Tabela 24 - Características do diodo BYW29 .....	52
Tabela 25 - Comparação dos parâmetros do controlo do boost teóricos e práticos ...	58
Tabela 26 - Análise de custo (integrados) .....	65
Tabela 27 - Análise de custo (componentes passivos) .....	66
Tabela 28 - Características dos condensadores utilizados .....	77
Tabela 29 - Característica das resistências utilizadas .....	77
Tabela 30 - Dados referentes aos condensadores usados no grupo de acionamento	79
Tabela 31 - Dados referentes às resistências usadas no grupo de acionamento .....	79
Tabela 32 - Dados referentes aos condensadores usados no grupo sensores .....	82
Tabela 33 - Dados referentes às resistências usadas no grupo sensores .....	82



# Índice de Figuras

Figura 1 – Área ardida face ao número de ocorrências entre 1995 e 2013.....	2
Figura 2- Evolução da munição do Projeto FIREND® .....	3
Figura 3 - Espoleta de tempos mecânica .....	5
Figura 4 - Espoleta de tempos eletrónica .....	5
Figura 5- Diagrama de blocos do sistema .....	9
Figura 6 - Vista em corte da espoleta.....	10
Figura 7 - Esquema dos pinos e orientação dos eixos do acelerómetro .....	14
Figura 8- Tempo de reação ADLX327 .....	15
Figura 9 - Secção Sallen-Key .....	15
Figura 10 – a) Modo de funcionamento Monoestável e b)Tabela de funcionamento do multivibrador.....	17
Figura 11 - Circuito EFI .....	18
Figura 12 - Constituição EFI .....	19
Figura 14- EBW .....	19
Figura 15 - Estrutura Semiconductor bridges .....	20
Figura 16 - Detonador laser .....	21
Figura 17 - Conversor boost .....	23
Figura 18 - Ganho estático do conversor boost.....	24
Figura 19 - Montagem do acelerómetro .....	29
Figura 20 - Offset do eixo X .....	31
Figura 21 - Offset eixo Y .....	31
Figura 22 - Offset do eixo Z .....	31
Figura 23 - Montagem do acelerómetro alimentado a bateria, inserida num pêndulo	32
Figura 24 - Esquema da experiência.....	32
Figura 25 - Saída do eixo X para as várias distâncias .....	33
Figura 26 - Saída do eixo Y para as várias distâncias .....	33
Figura 27 - Saída do eixo Z para as várias distâncias .....	33
Figura 28 - Saída X face a um impulso .....	34
Figura 29 - Saída Y face a um impulso .....	34
Figura 30 - Saída Z face a um impulso.....	35
Figura 31 - Montagem com rodas.....	35
Figura 32 - Filtro passa alto .....	37
Figura 33 - Diagramas de bode de amplitude e fase da função de transferência do filtro .....	38
Figura 34 - Saída do filtro (laranja) com sinal de entrada nulo (azul) .....	38
Figura 35 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 1Hz de frequência.....	39
Figura 36 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 500Hz de frequência.....	39
Figura 37 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 1kHz de frequência.....	39

Figura 38 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 2kHz de frequência .....	40
Figura 39 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 10kHz de frequência .....	40
Figura 40 - Esquema do amplificador não-inversor com alimentação assimétrica .....	41
Figura 41 - Saída do amplificador (azul) para entrada com 200mV de amplitude e 1kHz de frequência (laranja).....	42
Figura 42 - Saída do amplificador (azul) para entrada com 500mV de amplitude e 1kHz de frequência (laranja).....	42
Figura 43 - Sinal de entrada no filtro (700mV, 1kHz) (laranja) e sinal de saída do amplificador (azul).....	42
Figura 44 - Relação entre os componentes externos e a duração do impulso do monoestável.....	43
Figura 44 - Circuito do monoestável para um dos eixos .....	43
Figura 45 - Resultados experimentais do monoestável .....	44
Figura 47 - Esquematização do bloco de condicionamento de sinal do sensor. ....	45
Figura 48 – Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo X (azul) como entrada	45
Figura 49 - Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo Y (azul) como entrada	46
Figura 50 - Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo Z (azul) como entrada	46
Figura 51 - Circuito para criar referencia a ground.....	47
Figura 52 - Circuito regulador .....	48
Figura 53- Circuito para adaptar os níveis de tensão para 3V .....	48
Figura 54 - Dois níveis de tensão regulados .....	49
Figura 55 - Conversor boost .....	51
Figura 56 - Corrente na bobina (vermelho) e na carga (verde) .....	52
<i>Figura 57 - Correntes na bobina (esquerda) e carga (direita) ampliadas .....</i>	<i>52</i>
Figura 58 - Tensão na carga (verde) e sinal de controlo do conversor (vermelho) ....	53
Figura 59 - Tensão na carga do conversor ampliada .....	53
Figura 60 - Tensão no condensador quando o conversor não tem carga .....	53
<i>Figura 61 - Corrente na bobina (esquerda) e na carga (direita) para 24kHz .....</i>	<i>54</i>
Figura 62 - Tensão na carga para 24Hz .....	54
Figura 63 - Característica da corrente na bobina (esquerda) e na carga (direita) para 16kHz .....	55
Figura 64 - Característica da tensão na carga para 16kHz .....	55
Figura 65 - Circuito gerador de uma onda quadrada .....	56
Figura 66 - Saída do multivibrador .....	56
Figura 67 - Level shifter .....	57
Figura 68 - Resultado da simulação do level shifter .....	57
Figura 69 - Saída do level shifter (azul) e saída do multivibrador (amarelo).....	58
Figura 70 - Tensão no dreno do transístor 1 do conversor .....	58
Figura 71 - Tensão no condensador (conversor sem carga), atenuação 10x.....	59
Figura 72 - Dreno do transístor da carga com 0V na gate, atenuação 10x .....	59

Figura 73 - Tensão de entrada do conversor (azul) e tensão na carga do conversor (rosa), atenuação 10x .....	60
Figura 74 - Tensão no dreno do transistor da carga do conversor (azul) e sinal de controlo do transistor (verde), atenuação 10x .....	60
Figura 75 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25Hz (verde), atenuação 10x .....	61
Figura 76 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 250Hz (verde), atenuação 10x .....	61
Figura 77 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 2.5kHz (verde), atenuação 10x .....	61
Figura 78 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25kHz (verde), atenuação 10x .....	61
Figura 79 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25Hz (verde), atenuação 10x .....	61
Figura 80 - Circuito alterado do conversor elevador .....	62
Figura 81 - Saída do multivibrador, 20kHz e 70% de fator de ciclo .....	62
Figura 82 - Saída do level shifter com entrada de 20KHz e fator de ciclo de 70% .....	62
Figura 83 - Gate do transistor 1 (azul), dreno do transistor 1 (rosa), atenuação 10x .....	63
Figura 84 - Tensão no condensador do conversor .....	63
Figura 85 - Tensão no dreno do transistor da carga do conversor (amarelo) e tensão na gate do mesmo (verde) .....	64
Figura 86 - Comportamento global do sistema .....	67
Figura 87 - Simulação do cancelamento da activação da munição .....	68
Figura 88 - Comportamento do controlador ao detetar um impulso .....	68
Figura 89 - Dreno do transistor da carga do conversor (amarelo) e sinal que indica a detecção do movimento (azul) .....	69
Figura 90 - Circuito completo responsável pela Gestão de Energia .....	77
Figura 91 - Star Ground .....	78
Figura 92 - Circuito completo do sistema de acionamento e controlo do semiconductor do conversor .....	79
Figura 93 - Circuito completo do bloco de condicionamento do sinal dos eixos do acelerómetro .....	81





# Lista de Acrónimos e Siglas

CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DC	Direct Current
EBW	Exploding Bridge Wire
EFI	Exploding Foil Initiator
FFT	Fast Fourier Transform
LI-ION	Iões de Lítio
LOEMFA	Lei Orgânica do Estado Maior das Forças Armadas
MEMS	Micro-Eleto-Mechanical Systems
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NiCd	Níquel Cadmio
NiMH	Níquel Hidreto Metálico
PSD	Power Spectral Density
PWM	Pulse Width Modulation
SB	Semiconductor Bridge



# 1. Introdução

No presente capítulo apresentam-se os objetivos deste trabalho, a motivação para o realizar, o enquadramento e a estrutura da dissertação.

## 1.1 Objetivo

A presente dissertação surge no contexto do Projeto FIREND®, com o intuito de projetar, testar e construir um sistema eletrónico que permita controlar o acionamento de um projétil, com base em sinais elétricos. Para que tal seja conseguido, será desenvolvido um circuito com um sensor, um acelerómetro, que permita determinar o momento em que a munição ganha aceleração, isto é, o momento em que esta é lançada. Estudar-se-á qual o método de acionamento mais adequado e quais as condições que devem ser garantidas para que este ocorra, e ainda o sistema de gestão de energia de toda a espoleta, que é constituído pela bateria de alimentação e pelos circuitos necessários para fazer o devido ajuste para os níveis de tensão adequados, como veremos adiante. É importante salientar que este trabalho desenvolve apenas parte da espoleta electrónica.

## 1.2. Motivação e Enquadramento do Problema

Os incêndios florestais constituem uma realidade cujas consequências devem ser minimizadas. Podem ser causados por vários fatores, de onde se destacam:

- A falta de prevenção e limpeza das florestas;
- As monoculturas que permitem que os incêndios alastrem rapidamente por uma vasta área;
- As alterações climáticas que contribuem para temperaturas mais altas;
- O despovoamento nas zonas florestais, que levam à menor manutenção do solo e vigilância nessas áreas;
- Comportamentos negligentes, por exemplo, em alturas festivas o lançamentos de foguetes, e atos de má-fé propositadamente realizados com o intuito de causar danos.

De entre as inúmeras consequências que poderíamos apontar para os incêndios florestais, destacam-se as seguintes:

- Alterações ambientais causadas pelas emissões excessivas de  $CO_2$ ;
- Perda de biodiversidade, quer a nível animal, quer a nível vegetal;
- Degradação de habitats;
- Erosão dos solos, que deixam de ter plantas para os suportar;
- Elevados gastos económicos em transportes aéreos e terrestres no combate às chamas;

- A água salgada utilizada para apagar fogos atrasa a normalização do terreno, podendo contaminar recursos hídricos e inviabilizar o solo para utilizações agrícolas;
- Danos materiais e humanos.

A Figura 1 apresenta a área ardida, bem como o número de ocorrências verificadas ao longo dos anos, de 1995 a 2013, em Portugal. Facilmente se repara na gravidade do problema, se considerarmos que Portugal tem cerca de  $92000 \text{ km}^2$  e que, contabilizando apenas o ano de 2013, arderam cerca de  $80 \text{ km}^2$  [1].

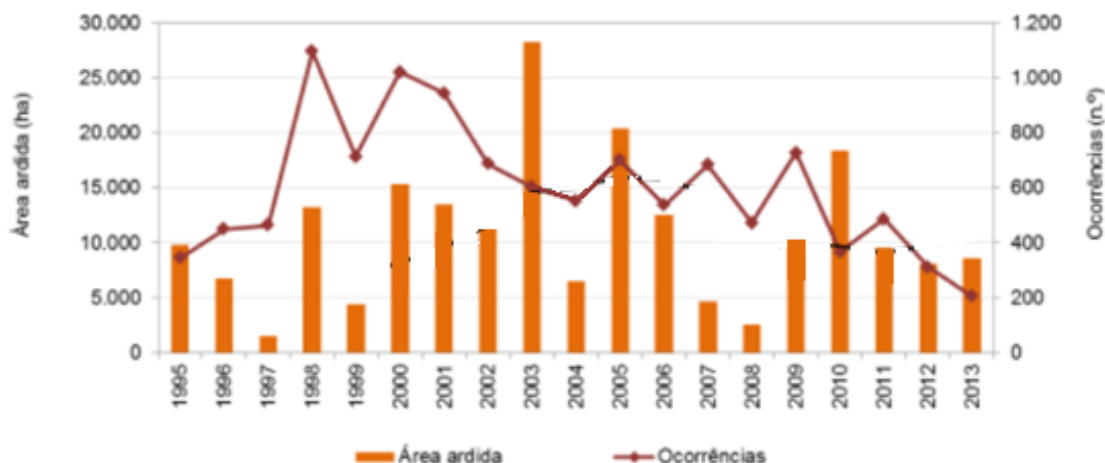


Figura 1 – Área ardida face ao número de ocorrências entre 1995 e 2013

Fonte: Incêndios Florestais na Rede Nacional de Áreas Protegidas em 2013

As Forças Armadas poderão constituir um reforço importante à Proteção Civil quando se verificar uma maior quantidade de frentes ativas, especialmente nos meses mais quentes.

Segundo a Constituição da República Portuguesa, está identificado como missão de interesse público a participação das Forças Armadas em missões relacionadas com a satisfação das necessidades básicas e a melhoria da qualidade de vida das populações, em colaboração com a proteção civil [2]. O Conceito Estratégico de Defesa Nacional especifica como missão de interesse público o apoio à proteção civil e com outras entidades competentes, realçando a contribuição para a proteção ambiental, defesa do património natural e prevenção de incêndios [3]. O emprego da componente militar para estes fins é determinado pelo Chefe de Estado Maior General das Forças Armadas, como definido na Lei Orgânica do Estado Maior General das Forças Armadas (LOEMGFA) [4].

Desde 1975 que o exército tem vindo a desenvolver vários projetos de vigilância, prevenção, combate a incêndios e rescaldo. É neste contexto que estão inseridos os Planos Vulcano, Lira e Braseiro [5].

Ainda no âmbito dos projetos das Forças Armadas e do combate aos fogos surge o Projeto FIREND®, que tem como objetivo projetar uma munição que ao libertar uma substância química sobre o fogo, o impeça de se expandir e se possível, o extinga. Esta munição de 155mm será compatível com os obuses existentes e o seu compartimento de carga terá cerca de  $7,5 \text{ dm}^3$ , permitindo uma área de atuação com cerca de  $75 \text{ m}^2$  [6]. Face aos elevados custos

do combate aéreo e à limitação imposta pelas condições meteorológicas e de visibilidade para operar os referidos aparelhos, ter uma munição que, ao ser lançada num obus, atinja zonas de difícil acesso, será vantajoso.

A escolha da espoleta deve ter em conta o objetivo que se pretende. Dado que o Projeto FIREND® tem como finalidade combater fogos, o sistema de acionamento da munição não poderá ser feito através de uma carga explosiva, havendo como tal a necessidade de se projetar um sistema eletrónico alternativo.

### 1.3 Estado da Arte

Este Projeto tem sido objeto de estudo por vários alunos da Academia Militar desde o ano letivo de 2004/2005, perfazendo um total de 8 dissertações. Os estudos efetuados focaram-se na geometria mais adequada para a munição, no sistema de ejeção mecânica após o impacto no solo e no sistema de altimetria.

Na Figura 2 apresenta-se a evolução da munição ao longo dos vários projetos.

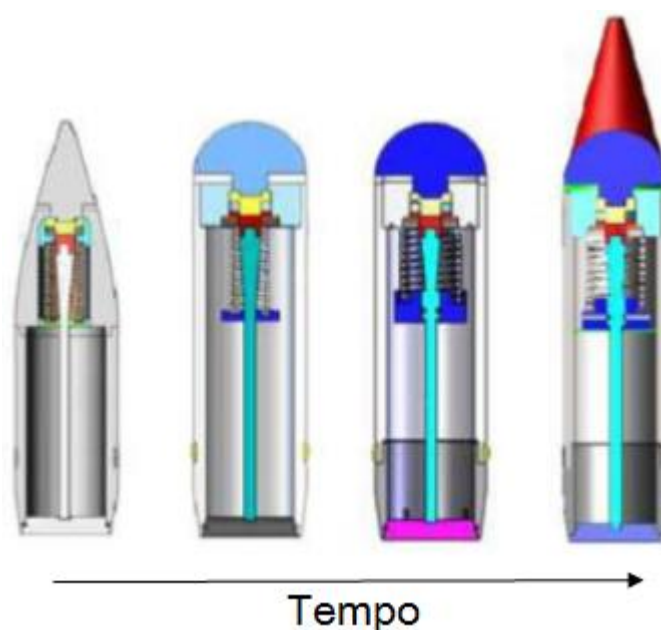


Figura 2- Evolução da munição do Projeto FIREND®

Fonte: adaptado de

<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145996704/disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>

Como se pode constatar, as primeiras evoluções foram feitas ao nível da geometria do projétil, de onde se destaca, no nariz do projétil, a alteração para uma espoleta com formato semiesférico, com o intuito de se aumentar a sua volumetria e o desempenho da espoleta mecânica. Nos anos seguintes, foi dada atenção aos subsistemas interiores, bem como às características de voo de onde resultou mais um subsistema, no nariz da munição, que permitia

compensar a aerodinâmica do projétil, como se verifica na última imagem da sequência da Figura 2.

Mais recentemente, deu-se a alteração do calibre do projétil de 105mm para 155mm, o que permitiu não só aumentar a volumetria do projétil, como o seu alcance.

Após o estudo do sistema de altimetria a espoleta deixou de ser mecânica, passando a ser eletrónica, para maximizar o potencial do químico transportado. Outra conclusão deste estudo é a definição dos limites da altura para se efetuar a libertação do químico, que devem estar compreendidos entre 7 e 20m do solo e é proposto a telemetria por impulsos como método de medida do sistema de altimetria [7].

Nesta diSSERTAÇÃO a alteração foca-se no desenvolvimento de uma espoleta electrónica.

No sentido de clarificar a noção de ‘espoleta’ apresenta-se nos pontos seguintes um resumo da evolução das espoletas e uma breve descrição de alguns projetos com objetivos semelhantes ao FIREND®.

## 1.4 Evolução das Espoletas

As espoletas surgem em meados de 1820, inovando as armas de fogo da época. Tratava-se de um cilindro fechado que continha uma certa quantidade de explosivo sensível ao choque, cuja finalidade era iniciar o projétil. Antes de esta ser introduzida, as armas utilizavam sistemas de ignição de pederneira para disparar a pólvora. Em 1850, a espoleta sofreu um melhoramento, tendo sido integrada no cartuxo metálico, onde se concentrava o explosivo [8].

Porém, os sistemas atuais são significativamente distintos, mantendo-se apenas o seu propósito.

Podem ser distinguidas como sendo dispositivos mecânicos, eletrónicos ou mistos, que permitem detonar uma determinada carga num projétil. Podemos classificá-las segundo vários critérios [9]:

- Função: Impacto, Tempo ou Proximidade;
- Posição da espoleta no projétil: nariz ou base;
- Tipos de mecanismo: Mecânica ou eletrónica;
- Ação no momento iniciador: Ignição ou detonação.

É de notar que este sistema deve ser seguro e não se pode armar indevidamente. A espoleta deverá apenas iniciar a explosão no momento para o qual foi programada e deve ser resistente o suficiente para suportar as condições de pressão e temperatura a que o projétil está sujeito.

A nomenclatura classifica ainda as espoletas nos seguintes tipos [9]:

- Esopoleta detonante auxiliar: trata-se de um fusível entre a espoleta e a carga principal que serve para detonar a mesma. Também pode ser utilizado como medida de segurança impedindo o projétil de explodir se o fusível principal for acionado acidentalmente antes do armamento do fusível do detonante auxiliar [10].

- Espoleta de base detonante: está localizada na base do projétil para evitar que se danifique. Funciona com o impacto do projétil com o alvo, mas também existe uma variante que permite inserir um atraso (mecânico), sendo a detonação feita após impacto [9].
- Espoleta ponto detonante: a detonação ocorre quase simultaneamente com o impacto com o alvo [11].
- Espoleta de tempo variável: através de ondas rádio, é capaz de emitir impulsos e de receber uma parte dos impulsos refletidos pelo alvo. A espoleta inicia a detonação quando o sinal de retorno for forte o suficiente, devido à proximidade [9].
- Espoleta de tempo: existem dois tipos, a mecânica e a eletrônica. A primeira apresenta um mecanismo de relógio, sendo que a detonação é programada através da rotação do corpo relativamente à tampa, que apresentam uma escala [12]. Na Figura 3 encontra-se exemplificada uma espoleta de tempos mecânica e na Figura 4 uma espoleta de tempos eletrônica.

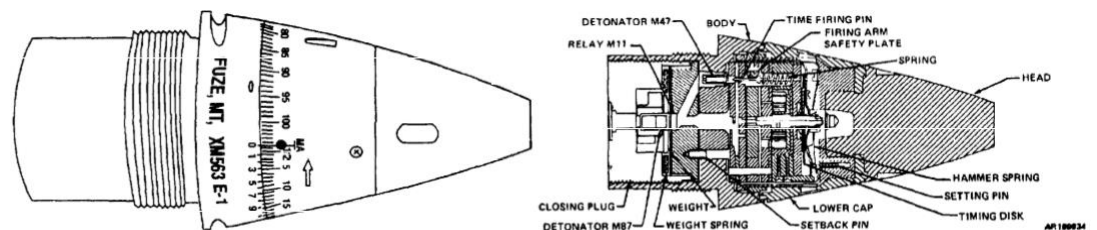


Figura 3 - Espoleta de tempos mecânica

Fonte: Army ammunition data sheets: artillery ammunition, guns, howitzers, mortars, recoilless rifles, grenade launcher and artillery fuzes, pg 7-17

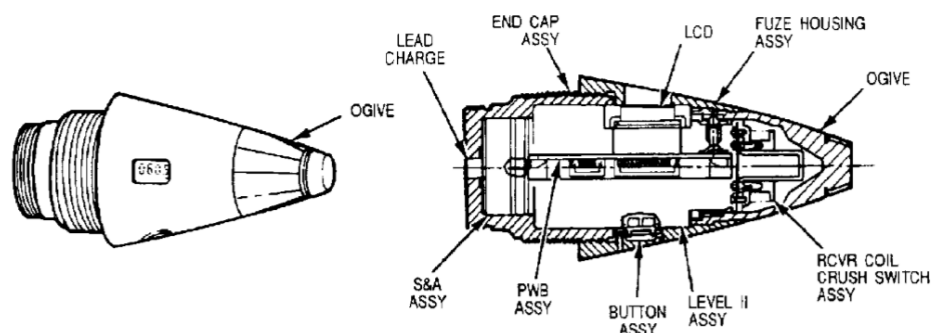


Figura 4 - Espoleta de tempos eletrônica

Fonte: Army ammunition data sheets: artillery ammunition, guns, howitzers, mortars, recoilless rifles, grenade launcher and artillery fuzes, pg 7-147

## 1.5 Projetos com Objetivos Semelhantes

Antes de se abordar concretamente o Projeto FIREND®, é de notar que já foram tomadas iniciativas, em anos passados, no sentido de se desenvolver um projétil, ou alguma forma de combate às chamas, semelhantes. Assim, destacam-se os seguintes projetos apresentados na Tabela 1:

*Tabela 1 – Projetos com objetivos semelhantes ao FIREND®*

<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Descrição abreviada</b>	<b>Diferença do FIREND®</b>
<b>1992</b>	Estados Unidos da América	É estudado um sistema, baseado num projétil, que permita suprimir fogo, a curtas distâncias, através da utilização de uma substância química, que estaria no interior do projétil. O sistema de ativação inclui um cristal e um contador. Existe ainda um sensor para indicar o momento em que o projétil adquire aceleração. Quando as condições necessárias ao acionamento estiverem reunidas é iniciado um fluxo de corrente que inicia a dispersão [13].	Ao contrário do FIREND®, este projétil não conseguia espalhar uniformemente sobre uma área considerável o químico retardante pois a detonação é feita aquando do embate com o solo e a sua aplicação está restringida a curtas distâncias.
<b>2005</b>	Estados Unidos da América	Trata-se de um sistema que permite o lançamento de vários projeteis simultaneamente. É controlado eletronicamente e permite o lançamento tanto de viaturas, como de aeronaves ou do solo. O lançamento pode ser feito quer em grupo, quer individualmente [14].	No caso do FIREND®, o lançamento será feito através de um obus.
<b>2006</b>	Estados Unidos da América	Nesta patente é apresentada a ideia de um projétil que permite retardar as chamas através de um químico, que é espalhado sobre as mesmas. Quando o projétil é acionado, forma-se uma massa de dióxido de carbono e nitrogénio que, devido à sua densidade, irá descer e reduzir os níveis de oxigénio junto da base do	Apesar destes dois projetos serem ativados ainda em voo, a principal diferença entre ambos consiste no acionamento. No FIREND® o sistema de acionamento não terá como principal elemento um explosivo.



		fogo, prevenindo reacendimentos [15].	
2012	Estados Unidos da América	Consiste num projétil de 40mm com aplicação em espaços interiores. O seu lançamento é possível a partir de pistolas ou carabinas e como granadas. O seu acionamento passa por um detonador térmico que irá permitir que um agente químico atenua, e se possível extinga as chamas [16].	No FIREND® não existe um detonador térmico e permite a aplicação para ambientes exteriores, com aplicação em vastas áreas.

## 1.6 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos:

- **Capítulo 1, Introdução** - Introdução e apresentação do tema dentro da sua envolvente institucional, definição do objetivo do trabalho e motivação para a sua realização. No estado da arte apresenta-se uma breve descrição de espoletas.
- **Capítulo 2, Projeto FIREND** - Abordagem e desenvolvimento dos parâmetros do projeto, bem como discussão de fundamentos teóricos que servem de alicerce ao trabalho em estudo.
- **Capítulo 3, Sistema Electrónico Proposto e Resultados** - Destina-se a descrever os procedimentos experimentais adotados e os materiais e equipamentos envolvidos. Inclui também o dimensionamento e a concretização dos blocos e a síntese de todos os resultados obtidos ao longo do trabalho, com o objetivo principal de se apresentar a melhor combinação possível de integrados, de entre os vários apresentados. É também feita a análise de custos.
- **Capítulo 4, Funcionamento Global do Circuito** – São apresentados os resultados principais obtidos do sistema desenvolvido.
- **Capítulo 5, Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros** – São apresentadas as conclusões que se podem retirar do projeto e também as perspectivas para trabalhos futuros, com o propósito de dar continuidade ao estudo aqui desenvolvido.

A **Bibliografia** e os **Anexos** complementam o documento, apresentando os dados que se revelaram importantes na realização de toda a pesquisa.



## 2. Projeto FIREND®

Para esta fase de desenvolvimento da espoleta electrónica para o projeto FIREND estão previstos dois blocos funcionais, apresentados na Figura 5: o sistema de comunicação e controlo da espoleta e o sistema de gestão de energia e ativação da mesma. A primeira parte, que está a ser desenvolvida no âmbito de outro trabalho de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, foca-se no controlador, que fará a ligação entre todos os blocos projectados, no relógio interno para verificação do tempo de voo, inserido pelo operador do obus, e na interface de comunicação. Já o sistema de gestão de energia e ativação, onde nos iremos focar, é constituído por um acelerómetro e por blocos de gestão de energia, que incluem duas baterias distintas, como veremos adiante, permitindo que estejam reunidas as condições necessárias para alimentar todos os circuitos e para se efetuar o acionamento.

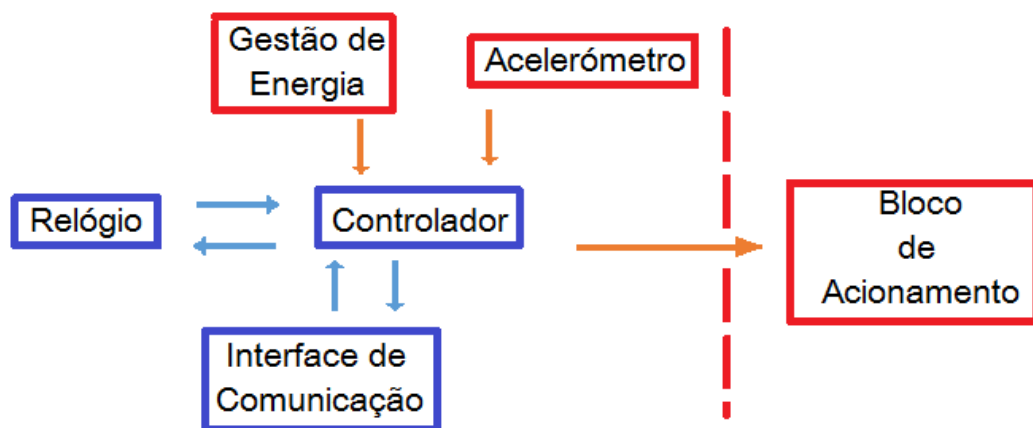


Figura 5- Diagrama de blocos do sistema

O projeto da espoleta tem algumas imposições, nomeadamente:

- As dimensões da munição que determinam o espaço disponível para o circuito;
- As temperaturas de funcionamento dos vários componentes, que vão estar sujeitos a temperaturas elevadas quer no momento de lançamento da munição, quer na aproximação às chamas;
- Os custos do conjunto devem ser razoáveis, dado que o sistema apenas é utilizado uma vez e é para produção em massa;
- Os problemas ambientais que podem advir dos materiais deixados no local.

Esta etapa do projeto permite reunir as condições necessárias para o bloco de acionamento desempenhar as suas funções, ainda com a munição em voo.

## 2.1 Parâmetros do Projecto FIREND

Existem vários aspetos importantes que devem ser considerados neste projeto. Um dos pontos verificados em dissertações anteriores concluía que o projétil deveria ser acionado antes do embate com o solo, mais precisamente entre 7 e a 20m do solo [17].

No presente projeto o parâmetro de acionamento será função do tempo de voo inserido pelo operador do obus, como referido anteriormente. É de salientar também que as dimensões físicas do projeto estão limitadas pelas dimensões do projétil adotado, como se pode constatar pelo corte da Figura 6. Dado que o projétil utilizado tem 155mm teremos disponível uma área menor que a área de um círculo com cerca de 15,5 cm de diâmetro para todos os componentes que irão integrar a espoleta. Todo o sistema deverá ainda ser capaz de suportar e manter o comportamento esperado após as acelerações resultantes do disparo e as várias variações de temperatura sofridas ao longo de todo o trajeto, tendo sido considerada uma gama de -40°C a 70°C.

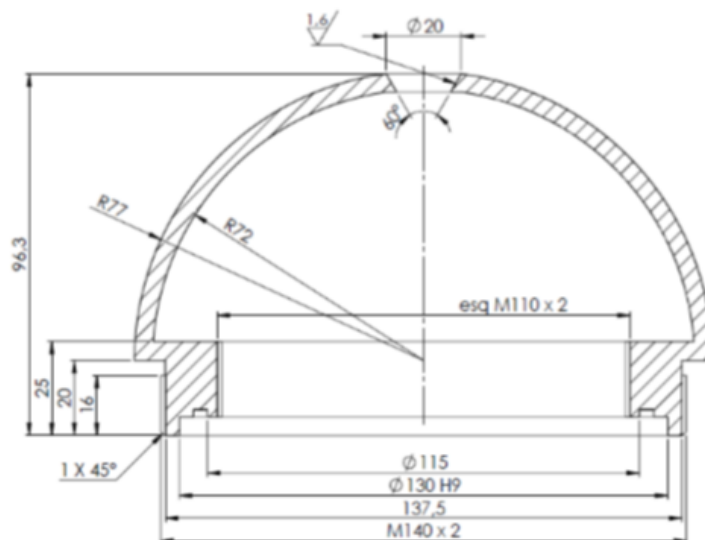


Figura 6 - Vista em corte da espoleta

Fonte: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145996704/disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>

Assim como em trabalhos anteriores, as tabelas de tiro de artilharia constituem uma importante ferramenta para se obterem alguns valores. Estas tabelas, na prática, permitem acertar o tiro, porém dão-nos outras informações, tais como as indicadas na Tabela 2:

Tabela 2- Dados da Tabela de Tiro

<b>M114A1</b>		
<b>Comprimento do cano</b>		23 calibres x 155 mm (3,565m)
<b>Velocidade de saída</b>	Carga 1 green bag	211,8 ms <sup>-1</sup>
	Carga 7 white bag	565,4 ms <sup>-1</sup>

É de notar que os valores foram consultados para o obus M114A1 e para uma carga de tiro 1 e uma carga de tiro 7, por serem os valores limite. Assim, a partir dos valores referidos é possível usar as seguintes relações:

$$v = v_o + at \Leftrightarrow t = \frac{v}{a} \quad (1)$$

$$x = x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2 \quad (2)$$

e substituindo a equação (1) em (2) obter:

$$a = \frac{v^2}{2x} \quad (3)$$

Tabela 3 - Especificação dos parâmetros utilizados

<b>Parâmetro</b>	<b>Definição</b>
$v$	Velocidade final
$v_o$	Velocidade inicial
$a$	Aceleração
$t$	Tempo de voo
$x$	Distancia percorrida
$x_o$	Posição inicial

Como nesta fase queremos determinar a aceleração da munição ainda dentro do tubo,  $x_o$  e  $v_o$  são considerados nulos. O valor de  $x$  na equação (3) é o mesmo que o comprimento do cano referido na Tabela 2.

Substituindo os valores da Tabela 2 nas equações anteriores obtemos os seguintes valores para a aceleração expressos na Tabela 4:

Tabela 4 - Aceleração calculada

<b>Carga</b>	<b>Velocidade de saída</b>	<b>Aceleração</b>
<b>Carga 1</b>	211,8 ms <sup>-1</sup>	6291,61 ms <sup>-2</sup>
<b>Carga 7</b>	565,4 ms <sup>-1</sup>	44835,5 ms <sup>-2</sup>

Estes dados terão importância na escolha do acelerómetro adequado, como veremos adiante.

Todo o sistema desenvolvido terá em conta o consumo de energia e os custos económicos associados, de forma a construir-se um sistema viável em todos os aspetos.

Este trabalho é constituído por três blocos funcionais:

- Sensor de aceleração
- Gestão de energia do sistema
- Acionamento da libertação do agente extintor

### 2.1.1 Sensor de Aceleração

O elemento principal deste grupo é o acelerómetro que irá detetar o momento em que a munição inicia o movimento. Este sensor tem um papel fundamental no funcionamento da espoleta, dado que irá informar o bloco controlador do instante em que o relógio deve iniciar a contagem, para que o tempo de voo inserido seja respeitado. Com este tipo de sensores também será possível obter informações relativas a inclinações, rotações, vibrações e distâncias percorridas, se desejado.

Existem vários tipos de acelerómetros, sendo os mais comuns os seguintes [18]:

- Capacitivo: existe uma massa de prova entre duas placas paralelas, o que forma dois condensadores. As alterações da distância das placas do condensador influenciam diretamente a capacidade, que é dada pela expressão  $C = \frac{\epsilon A}{d}$ , onde C é a capacidade do condensador,  $\epsilon$  é a constante de permissividade relativa do isolante, A é a área e d a distância entre as duas placas. Essa variação do valor da capacidade irá alterar o valor do sinal de saída, permitindo a determinação do valor da aceleração;
- Piezoelétrico: contem um material piezoelétrico. Numa amostra paralelepípedica deste tipo de material, admitindo que é sujeito a uma força perpendicular a um dado par de faces, aparece uma diferença de potencial entre elas. Assim sendo, quando o acelerómetro for sujeito a vibrações o cristal fica sujeito a forças de compressão, apresentando assim uma tensão que depende da força aos seus terminais;
- Piezoresistivo: neste caso, o movimento faz com que o valor da resistência varie, o que permitirá calcular o valor da aceleração;
- Sistemas mecânicos-microeletrónicos (MEMS): apresentam uma estrutura em Silício e possibilitam a deteção da aceleração em eixos distintos. O movimento medido será expresso na saída como a variação de um sinal digital ou analógico.

Devido à vasta gama de acelerações que estes dispositivos conseguem medir existem inúmeras aplicações em que os podemos encontrar, entre os quais se incluem sistemas de posicionamento, sensores de inclinação de telemóveis, *airbags* e outras aplicações da indústria automóvel, estudos de acústica e vibrações, entre outros.

Para a escolha do circuito mais adequado para esta aplicação há que ter em conta vários aspetos, como a gama das tensões de alimentação, os intervalos de medida (tempo de resposta) que permitem, o número de eixos de trabalho, a sensibilidade (gama de variação da saída quando a uma determinada entrada), a frequência de resposta (frequência para o qual o aparelho regista e transmite o sinal dada uma aceleração) e as dimensões do integrado.

É também importante referir que para este tipo de aplicações são usados acelerómetros integrados que apresentem no mínimo um intervalo de medida de  $\pm 16g$  [19].

Outro aspeto a evidenciar é que os acelerómetros medem um valor máximo de 10000g, o equivalente a  $98000 \text{ ms}^{-2}$ , o que significa que existe uma margem confortável relativamente ao valor máximo de aceleração calculados na Tabela 4.

Assim sendo, para se proceder à escolha do acelerómetro mais adequado procedeu-se ao estudo comparativo, resumido na Tabela.

*Tabela 5 - Comparação de sensores*

	<b>ADLX 321</b>	<b>ADLX 326</b>	<b>ADXL327</b>	<b>ADIS 16240<sup>1</sup></b>
<b>Tensões de alimentação</b>	2,4 a 6V	1,8 a 3,6V	1,8 a 3,6V	2 a 3,6V
<b>Intervalos de medida</b>	$\pm 18g$ (valor médio)	$\pm 19g$ (valor médio)	$\pm 2g$ (valor médio)	$\pm 19g$
<b>Leitura máxima</b>	10000g	10000g	10000g	10000g
<b>Número de eixos</b>	2	3	3	3
<b>Sensibilidade</b>	51 a 63 mV/g	51 a 63 mV/g	51 a 63 mV/g	51,4 mg/LSB
<b>Frequência de resposta (s/filtro)</b>	Eixo X e Y: 5.5 kHz	Eixo X e Y: 1600 Hz	Eixo X e Y: 1600 Hz	Eixo X e Y: 1600 Hz
		Eixo Z: 550 Hz	Eixo Z: 550 Hz	Eixo Z: 550 Hz
<b>Dimensões</b>	4x4x1,45 mm	4x4x1,45 mm	4x4x1,45 mm	12x12 mm
<b>Corrente</b>	350 $\mu A$	350 $\mu A$	350 $\mu A$	1 mA
<b>Desvio de zero (offset)</b>	1.5V	1.5V	1.5V	$\pm 1$
<b>Gama de Temperaturas</b>	-20° a 70°C	-40° a 85°C	-40° a 85°C	-40° a 85°C

No que diz respeito à gama de temperaturas de funcionamento, o ADLX 321 tem como limite superior 70°C, que é a temperatura limite dada como parâmetro do projeto. É ainda

<sup>1</sup> Acelerómetro digital

importante salientar que os acelerômetros das três primeiras colunas são analógicos, enquanto o quarto é digital. A aplicação de um acelerômetro digital torna-se vantajosa para se estabelecer a comunicação com o controlador, caso este também seja digital, porém, há também que ter em conta que os acelerômetros digitais apresentam um custo mais elevado por unidade.

Pela análise dos valores acima, conclui-se que o ADXL 326 é o integrado mais adequado, dado que respeita o intervalo de medida mínimo e as tensões de alimentação estão dentro da gama de valores desejados. Porém, dado que é pretendido estudar a viabilidade do modelo proposto para a espoleta eletrônica, os ensaios serão efetuados com o equivalente ADXL 327. Este integrado permite a medição de acelerações dinâmicas e estáticas.

Na Figura 7 apresenta-se o esquema das várias entradas e saídas do encapsulamento do circuito. De destacar os pinos 14 e 15 que constituem as entradas e os pinos 12, 10 e 8 que integram as saídas dos eixos X,Y e Z respetivamente.

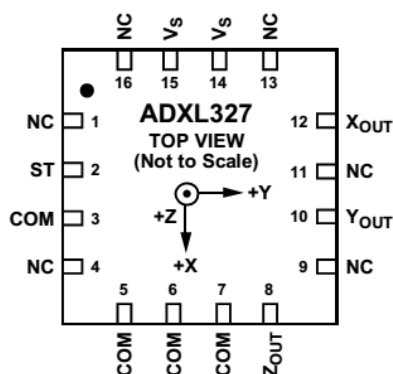


Figura 7 - Esquema dos pinos e orientação dos eixos do acelerômetro

Fonte: Datasheet ADXL 326

Os pinos 14 e 15 devem estar ligados a condensadores de desacoplamento do ruído oriundo da fonte de alimentação, que pode originar erros de medição. Por vezes pode ser necessário a adição de uma resistência de 100 $\Omega$ , ou menor, no circuito de alimentação ou a adição de mais condensadores em paralelo com  $C_{DC}$ , mas apenas serão considerados para a montagem se se verificar necessidade de reduzir o ruído transmitido por  $V_S$ .

Será também necessário ligar condensadores nos pinos 12, 10 e 8,  $C_x$ ,  $C_y$  e  $C_z$  respetivamente, de acordo com a largura de banda que escolhermos. Estes valores irão condicionar as medições da aceleração e a sua resolução. Sabemos que para o acelerômetro trabalhar corretamente deverá funcionar abaixo da sua frequência de ressonância, que para o ADXL327 é 5,5KHz. Impôs-se como frequência mínima de funcionamento 1Hz. A largura de banda da saída é tipicamente superior a 500Hz. Na Tabela 5 podemos verificar quais os valores típicos para cada eixo. Assim sendo, o valor destes condensadores deverá ser no mínimo 0.01 $\mu$ F para se obter uma largura de banda de 500Hz. A adição destes condensadores permite, à semelhança dos anteriores, contribuir para um aumento da relação sinal/ruído. O ruído deste componente tem as características do ruído gaussiano [20].



Outro aspeto de relevância que se encontra na *datasheet* é o tempo de reacção do integrado, apresentado na Figura 8. Na figura seguinte temos representado no canal 1 um sinal de entrada, e nos canais 2, 3 e 4 temos respetivamente as saídas X, Y e Z. Constatase que para os três eixos o tempo de reacção é semelhante, apresentado, para uma entrada de 3V um período de tempo de 1 ms a reagir ao sinal.

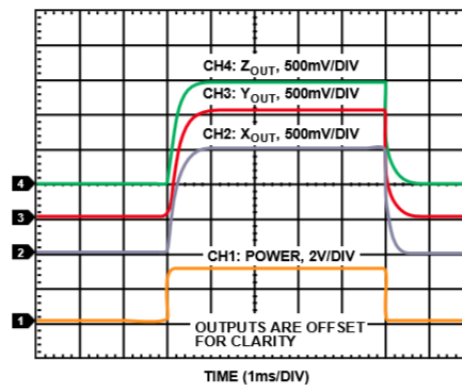


Figura 8- Tempo de reacção ADXL327

Fonte: Datasheet ADXL326

Para se poder condicionar o sinal de saída do acelerómetro, este deverá ser filtrado e amplificado.

A necessidade do sinal ser filtrado está relacionada com o facto de não se poder permitir que um pequeno movimento de manipulação da munição inicie o processo de disparo involuntariamente. Assim sendo, os sinais de baixas frequências deverão ser filtrados através de um filtro passa alto.

Existem várias aproximações que permitem a sua realização, sendo as mais conhecidas a de Butterworth e a de Chebychev. De forma a facilitar a implementação do filtro, será utilizada a Secção Sallen-Key, que se encontra esquematizada na Figura 9.

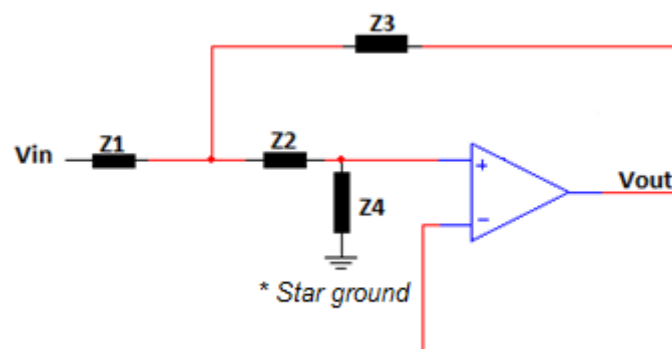


Figura 9 - Secção Sallen-Key

Como se trata de um filtro passa-alto,  $Z_1$  e  $Z_2$  são condensadores e  $Z_3$  e  $Z_4$  são resistências. Relativamente às suas características, destaca-se que por ser um filtro de

segunda ordem garante a estabilidade do sistema. Serão necessárias três secções de Sallen-Key, uma para cada eixo.

No que diz respeito à escolha do amplificador um dos fatores importante a ter em conta é a taxa de variação da saída (*slew rate*) do mesmo, pois apesar do nosso objetivo principal ser amplificar o sinal, a velocidade com que o processo é feito é relevante devido ao carácter do projeto. A Tabela 6 serviu de auxiliar na seleção do mesmo. O facto do OP 482 possibilitar a amplificação de quatro sinais distintos representa uma grande vantagem, dado que vamos ter três saídas oriundas do acelerómetro, apesar deste amplificador operacional não ser o mais rápido. Por outro lado, o LM324 apresenta a possibilidade de uma montagem com alimentação assimétrica da bateria.

*Tabela 6 - Parâmetros dos amplificadores*

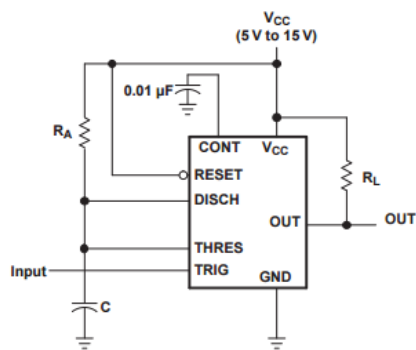
	<b>Tensão de Alimentação</b>	<b>Taxa de Variação</b>	<b>Largura de Banda</b>	<b>Número de Amplificadores</b>
Amp 741	±3 a ±15V	0,7 V/μs	1,5 MHz	1
OP 32	±3 a ±18V	17 V/μs	63 MHz	1
OP 482	±4,5 a ±18V	9 V/μs	4 MHz	4
LM 324	±1.5 a ±16V 3 a 32V	0,4 V/μs	1.3 MHz	4

Ainda antes de se transmitir o sinal ao microcontrolador, este deverá ser condicionado a um impulso de uma certa duração de forma a garantir tempo para acionamento coerente, isto é, impedir que o acionamento seja ativado devido a qualquer movimento detetado que não seja o lançamento da munição. Para fazer esse condicionamento dimensionou-se um multivibrador monoestável, de forma que, quando aplicado um impulso na entrada, é emitido um impulso com uma determinada duração determinado por uma resistência e um condensador, ligados externamente ao circuito.

*Tabela 7 – Parâmetros dos monoestáveis*

	<b>Tensão de Alimentação</b>	<b>Gama de temperaturas</b>	<b>Número de circuitos</b>
74221	4,5 a 5,5V	0° a 70°C	2
556	4,5 a 16V	0° a 70°C	2
4098	3 a 18V	-55° a 125°C	2
14538	3 a 18V	-55° a 125°C	2

Os multivibradores apresentados na Tabela 7 são bastante semelhantes, como tal, o critério utilizado para a escolha do integrado a utilizar foi o custo unitário de cada elemento, sendo o mais viável o 556.



a)

**FUNCTION TABLE**  
(each timer)

RESET	TRIGGER VOLTAGE <sup>(1)</sup>	THRESHOLD VOLTAGE <sup>(1)</sup>	OUTPUT	DISCHARGE SWITCH
Low	Irrelevant	Irrelevant	Low	On
High	$< 1/3 V_{DD}$	Irrelevant	High	Off
High	$> 1/3 V_{DD}$	$> 2/3 V_{DD}$	Low	On
High	$> 1/3 V_{DD}$	$< 2/3 V_{DD}$	As previously established	

b)

Figura 10 – a) Modo de funcionamento Monoestável e b) Tabela de funcionamento do multivibrador  
Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/na556.pdf>

A Figura 11 traduz a montagem e alguns dados do circuito integrado. Analisando-a, podemos constatar que a saída estará condicionada pela variação da entrada, consoante esta se assumir superior ou inferior a  $\frac{2}{3} V_{DD}$ . Sempre que for detectado um valor superior a este limite teremos a saída no nível baixo, 0V, com duração definida pelos componentes passivos externos.

Para esta aplicação, vão ser necessários dois integrados, que irão receber os sinais proveniente da amplificação dos sinais de cada eixo. Esta ligação permitirá que o sinal gerado no acelerómetro origine um impulso que será enviada para o microcontrolador, impedindo que o sinal recebido por este último componente seja dúbio.

## 2.1.2 Acionamento da Libertação do Agente Extintor

Este bloco funcional é constituído pelos dispositivos que geram o sinal elétrico responsáveis pela abertura do projétil. Por questões de segurança, aquando do lançamento do projétil este bloco deverá estar inativo.

Foram identificados vários potenciais detonadores que vão ser devidamente explorados fora do âmbito deste trabalho, a fim de se determinar qual o mais adequado às especificações do projeto. Segundo um relatório da NATO podemos considerar [21]:

- *Low energy exploding foil initiator (ou slapper);*
- *Lower voltage exploding bridge wire;*
- *Semiconductor bridges;*
- *Laser ou plasma detonators.*

A utilização destes elementos, ainda segundo o mesmo relatório, apresenta como vantagens as suas reduzidas dimensões, o seu baixo custo e a sua resposta rápida [21].

Existe ainda outra opção a ser discutida, nomeadamente a aplicação de materiais piezoelétricos.

### 2.1.2.1 *Exploding foil initiator* (EFI)

Começaram a ser usados em 1980 por se tratar de um método seguro para iniciar cadeias explosivas. Este sistema permite a eliminação de conjuntos mecânicos de segurança e de armar o detonador, porém tem que garantir que inicia a carga principal. O seu funcionamento baseia-se numa pequena explosão de um material metálico, originada pela descarga da energia armazenada num condensador. Esse condensador armazena uma certa energia, e quando o interruptor (que se pode visualizar na Figura 12) é fechado, a energia é descarregada no referido metal, originando uma pressão num dielétrico, que, através de um impacto com o material explosivo origina a explosão [22].

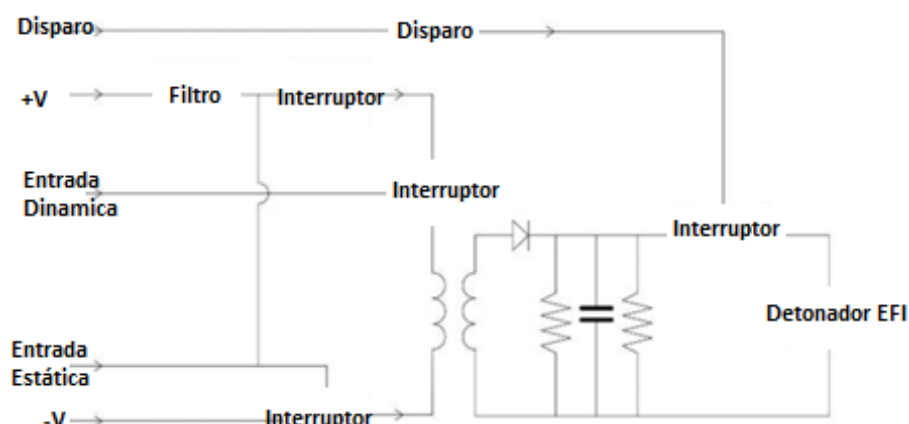


Figura 11 - Circuito EFI

Fonte: adaptado de *Recent developments in Exploding Foil Initiator (EFI) based electronic safety, arming and initiation systems*

Um aspeto a referir é o facto de a gama de funcionamento ser de 2 a 3 kV, o suficiente para originar um impulso de corrente capaz de originar uma pequena explosão. Atualmente, estão a ser feitas pesquisas para possibilitar reduzir o tamanho do sistema, diminuindo a tensão de operação para 1,2 kV ou menos. O tempo total da explosão é na ordem de 500ns [23].

A Figura 13 mostra a composição deste tipo de iniciador do lado esquerdo, e do direito uma pequena explosão conseguida através deste método.

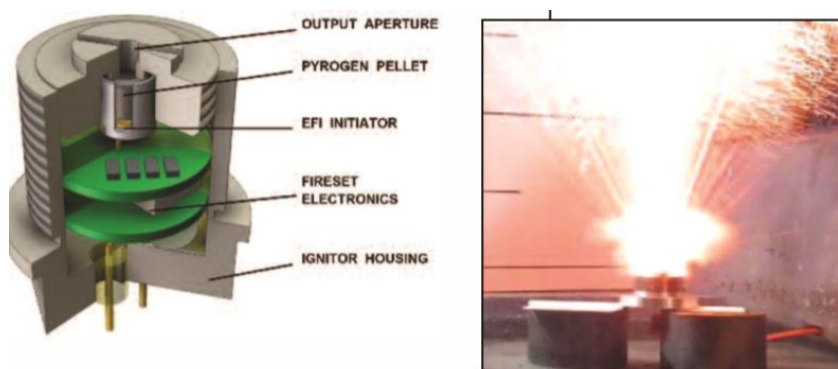


Figura 12 - Constituição EFI

Fonte: *Recent developments in Exploding Foil Initiator (EFI) based electronic safety, arming and initiation systems*

### 2.1.2.2 Exploding bridge wire (EBW)

Estes iniciadores, apresentados na Figura 14, têm várias aplicações em perfurações petrolíferas dado que são imunes a radiofrequências e fontes de tensão parasitas [24].

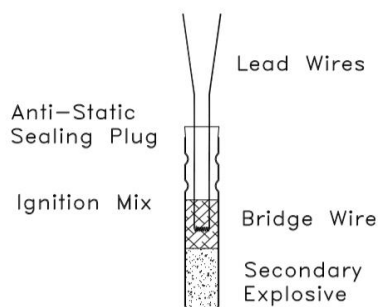


Figura 13- EBW

Fonte: *Electric Detonators Used in Wireline Operations*

Ao ser aplicada uma determinada tensão aos terminais do dispositivo, o fio que constitui a ponte irá explodir e transferir a energia para o explosivo secundário, iniciando-o. À semelhança do método descrito anteriormente, a energia terá que ser armazenada num dispositivo até atingir cerca de 1,2 kV [25].

### 2.1.2.3 Semiconductor bridges

Este dispositivo é acionado através de um pico de corrente que origina uma descarga capaz de acionar um material explosivo, que está prensado contra uma determinada região (ponte). O seu funcionamento, de forma mais detalhada permite dizer que os condutores elétricos estão ligados a um condensador que possibilita escolher a energia da descarga. Analisando a sua estrutura na Figura 15, podemos verificar que é constituído por uma estrutura de Silício policristalino dopado com fósforo num substrato de Silício. Sobre a parte periférica da estrutura é adicionada uma camada de alumínio, permitindo fazer ligações. A inflamação do material pode ocorrer de duas formas, ou com valores de corrente baixos durante alguns milissegundos ou através de um pico de corrente de curta duração, aumentando a temperatura fazendo com que a ponte mude de estado físico [26].

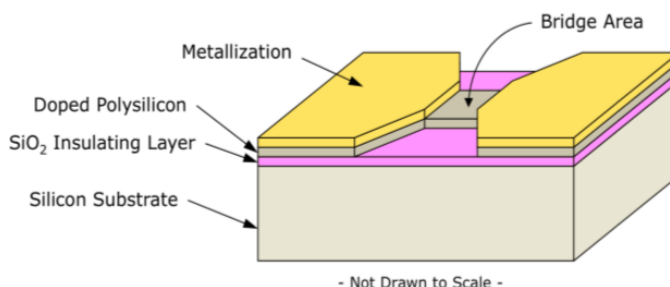


Figura 14 - Estrutura Semiconductor bridges

Fonte: Performance Characterization of Nanoscale Energetic Materials on Semiconductor Bridges (SCBs)

Este dispositivo apresenta-se como sendo rápido e seguro. Para além destas características é imune a radiofrequências. É utilizado para a abertura de dispositivos explosivos ou para geração de gás (airbags) [27].

### 2.1.2.4 Laser or plasma detonators

Esta tecnologia começou a ser explorada em meados de 1970. Os estudos da época revelaram ser possível detonar um material através da incidência direta de um feixe laser de baixa intensidade num explosivo, através de uma estrutura como a da Figura 16. Existem vários fatores que influenciam o processo, tais como o diâmetro do feixe, a área da janela pelo qual o feixe passa e a espessura do revestimento da mesma. Por exemplo, verifica-se que energia necessária para a detonação pode ser reduzida ao revestir-se a janela de um material metálico do lado onde se coloca o explosivo para melhorar a absorção de energia. [28]

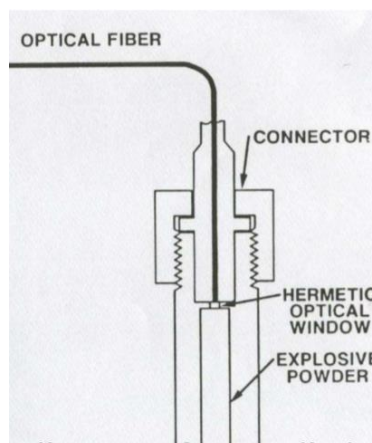


Figura 15 - Detonador laser

Fonte: *Laser applications in armaments*

### 2.1.2.5 Materiais piezoelétricos

Os materiais que quando sujeitos a pressão mecânica produzem uma determinada tensão são designados por materiais piezoelétricos. Este fenómeno ocorre devido à organização das cargas positivas e negativas na superfície do cristal, de acordo com a sua simetria [29]. Tem aplicação em várias áreas, como na telemetria, para medição de distâncias, e em sistemas de radar e sonar [30].

Neste caso, o ideal seria a utilização de um transdutor piezoelétrico que convertesse energia elétrica numa grandeza mecânica, possibilitando o acionamento da munição. Sabe-se que já existem várias aplicações a nível militar de cerâmicas piezoelétricas, quer em equipamento submarino, quer em sistemas de armas da marinha [31], porém não existe informação suficiente para se concluir sobre a aplicabilidade deste material neste caso concreto.

Assim, através dos dados recolhidos, foi possível reagrupar os dados de projeto mais importantes. Devido ao facto dos parâmetros recolhidos não serem os mesmos para cada tipo de acionamento abordado, optou-se por fazer várias tabelas.

Na Tabela 8 são comparados os métodos EFI e EBW, a Tabela 9 apresenta os dados referentes ao método SB e na Tabela 10 estão os dados do laser.

Tabela 8 - EFI e EBW

	$I_{bth}$	$V_{th}$	$V_{th}$ std.deviation	$t_{ime}$	$t_{ime}$ deviation
<b>EFI</b>	-	1350V	50V	1.06 $\mu$ s	-
<b>EBW</b>	180 A	500V	75V	2.8 $\mu$ s	$\pm 0.5\mu$ s

Ao aplicar-se a mesma energia (250 mJ) aos processos *Exploding Bridge Wire* e *Exploding Foil Initiator* verifica-se que o primeiro demora 2 $\mu$ s a reagir, enquanto que o segundo leva apenas 0.5 $\mu$ s.

Tabela 9 - SB

	<b>No fire</b>	<b>All fire dc</b>	<b>all fire ac</b>	<b>all fire</b>	<b>functioning delay</b>
<b>B</b>	1A	1200mA	14A	3-5mJ	<60μs

Tabela 10 - Laser

<b>Tempo de resposta</b>	<b>1.2μs</b>
<b>Dispersão do tempo resposta</b>	<b>±100ns</b>
<b>Energia impulso</b>	<b>1-50mJ</b>
<b>Intensidade do foco</b>	<b>10<sup>12</sup> W/mm<sup>2</sup></b>
<b>Atraso</b>	<b>5-100ms</b>

O que se pode concluir nesta etapa é que os processos EFI e EBW são bastante semelhantes e que trabalham com valores de tensão muito elevados. Já os valores referentes aos SB, quanto à corrente são mais reduzidos comparativamente com os métodos anteriores. Quanto ao laser, é de destacar o tempo de resposta apresentado, que é adequado, mas o sistema necessita de um foco com uma elevada intensidade.

Todos os métodos acima referidos têm em comum requererem uma certa quantidade de explosivo e quantidades de energia bastante elevadas. Como um dos requisitos é não utilizar como recurso materiais explosivos, os métodos descritos acima são inviáveis.

Nesse sentido, segundo outro relatório da NATO, onde são descritas várias tecnologias adotadas nas espoletas no sentido de melhorar o desempenho das mesmas, é referido que os requisitos de alimentação de uma espoleta são tipicamente 28V e 0,5A, porém estes valores podem ser adaptados [32].

Tomando em consideração os valores apresentados na Tabela 9, onde a energia requerida para o acionamento, segundo o método *Semiconductor Bridge*, varia entre 3 e 5mJ, e lembrando que a potência é dada pela energia requerida por unidade de tempo, consegue-se, a partir de 5mJ de energia durante 350μs, verificar que a potência requerida é de 14W .

Estes valores podem ser facilmente conseguidos através de um conversor elevador, cujo funcionamento se encontra descrito no subcapítulo 2.1.3 Gestão de Energia.



### 2.1.3 Gestão de Energia do Sistema

Este circuito inclui as baterias que permitem a alimentação dos vários blocos e circuitos. Existem duas baterias, uma dedicada ao “*power up*” e ao fornecimento de energia aos circuitos de controlo e comando e outra dedicada ao bloco de acionamento da espoleta, que será visto adiante.

Devemos ainda ter em conta que a tensão nominal das baterias usadas não é geralmente a tensão de alimentação necessária para os vários blocos funcionais, e nesse caso o valor deve ser adaptado. Para tal poderão ser utilizados conversores DC-DC elevadores (*boost*) ou redutores (*buck*). Nestes conversores o semicondutor pode ser controlado por PWM, sendo o fator de ciclo o parâmetro que permite ajustar a tensão de saída para o valor desejado.

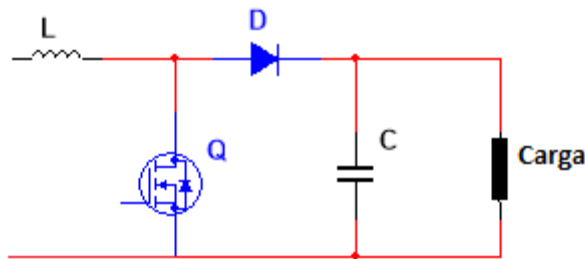


Figura 16 - Conversor boost

No que diz respeito ao conversor *boost*, representado na Figura 17, este tipo de conversor permite elevar a componente DC da tensão de entrada. O seu funcionamento pode ser descrito de uma forma muito simples através da Figura 17. Consoante um determinado fator de ciclo, o MOSFET está à condução, e o diodo aberto, havendo um trânsito de corrente entre os terminais dreno e fonte através da bobina. Quando o MOSFET abre, o diodo entra em condução, permitindo corrente no ramo da carga e do condensador. Uma vez que o condensador já esteja carregado, o ciclo descrito irá repetir-se, com a única diferença que o condensador vai descarregar na carga quando o diodo estiver ao corte.

A relação entre as tensões de entrada ( $V_{in}$ ) e saída ( $V_{out}$ ), o *duty-cycle* ( $\delta$ ) e o período do impulso de controlo ( $T$ ), para o modo de condução contínua, é a seguinte:

$$V_{in}\delta T = (V_{out} - V_{in})(1 - \delta)T \quad (4)$$

e como tal, o seu ganho estático, no regime não lacunar, é dado por:

$$G(\delta) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-\delta} \quad (5)$$

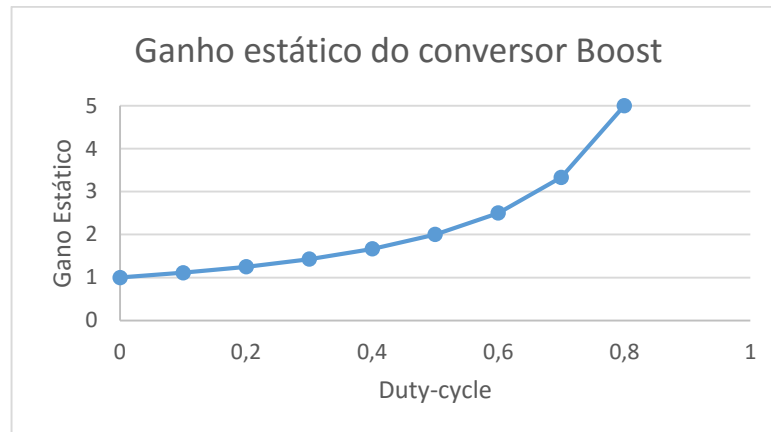


Figura 17 - Ganho estático do conversor boost

Como se pode verificar na Figura 18, o ganho é idealmente crescente e sempre superior a 1, no entanto, para conversores reais, as perdas limitam este crescimento para valores de factor de ciclo muito elevados.

O conversor têm a possibilidade de funcionar em dois modos distintos: o modo de funcionamento contínuo, isto é em regime não lacunar, caracterizado pelo facto da corrente da bobina não atingir valores nulos, e modo de funcionamento descontinuo, ou regime lacunar, onde a corrente da bobina toma durante um certo intervalo de tempo o valor zero.

### 2.1.3.1 “Power up” do circuito

Para se proceder à escolha da bateria mais adequada à alimentação do sistema deveremos ter em conta as necessidades de cada bloco utilizado, que irá depender dos integrados escolhidos.

Assim, o valor da tensão nominal da bateria terá que garantir os níveis de tensão adequados a cada componente e o seu valor só poderá ser acertado após se ter um panorama geral de todo o circuito. Algumas das principais características a ter em conta neste processo são a tensão nominal, a capacidade nominal da bateria e a gama de temperaturas de descarga. De notar que a bateria dedicada ao “power up” do circuito é distinta da bateria dedicada ao acionamento da carga detonadora, podendo ter características diferentes por se dedicarem a diferentes fins.

Com o objetivo de se procurar o tipo de bateria mais adequada foi necessário distinguir os vários tipos existentes [33]:

- Níquel Cadmio (NiCd): são as pilhas mais comercializadas. Tem uma baixa densidade de energia e longa duração. São tóxicas para o ambiente.
- Níquel Hidreto Metálico (NiMH): apresentam uma densidade de energia superior à anterior, mas tem um ciclo de vida e uma toxicidade menor.

- **Ácido Chumbo:** apresenta dimensões elevadas, tornando-se viável apenas se existir muito espaço disponível, o que não se verifica. São altamente poluentes.
- **Lítio (Li-ion):** apresenta uma elevada densidade de energia e um peso reduzido. Estas baterias exigem alguns cuidados e atenção relativamente à temperatura a que estão expostas dado que o lítio é uma substância que origina facilmente chamas.
- **Polímero de Lítio:** é bastante semelhante à anterior no que diz respeito à densidade de energia, porém apresenta dimensões inferiores.

De forma a facilitar a análise dos vários tipos de baterias construiu-se a Tabela 11 [33]:

*Tabela 11 - Comparação dos tipos de baterias*

<b>Tipo</b>	<b>NCd</b>	<b>NiMH</b>	<b>Li-Ion</b>	<b>Li-Ion Polímero</b>	<b>Ácido-Chumbo</b>
<b>Característica</b>					
<b>Densidade de Energia (Wh/kg)</b>	45 a 80	60 a 120	110 a 160	100 a 130	30 a 50
<b>Resistência Interna (mΩ)</b>	100-200	200-300	150-250	200-300	<100
<b>Corrente Pico/ Médio (C)</b>	20 / 1	5 / 0.5	2 / 1	2 / 1	5 / 0.2
<b>Ciclo de Vida</b>	1500	200 a 3000	500 a 1000	300 a 500	200 a 300
<b>Tempo de Carga</b>	1h	2 a 4h	2 a 4h	2 a 4h	8 a 16h
<b>Auto Descarga/ Mês</b>	20%	30%	10%	10%	5%
<b>Tensão Nominal por célula (V)</b>	1.25	1.25	3.6	3.6	2
<b>Temperatura de funcionamento</b>	40 a 60°C	20 a 60°C	20 a 60°C	0 a 65°C	20 a 60°C
<b>Custo (€)<sup>2</sup></b>	6.88	2.82	10.63	11.92	7.98

Alguns dos parâmetros evidenciados são mais relevantes que outros. O desejável é que a densidade de energia seja elevada, assim como a tensão nominal. O tempo de carga não é um parâmetro importante dado que a bateria não será reutilizada. Analisando os valores da Tabela 11, verifica-se que as baterias com a tecnologia de Lítio e Polímero de Lítio são as que apresentam os referidos parâmetros em maior quantidade. As baterias de Polímero de Lítio detêm a gama de temperaturas de funcionamento mais baixa face às restantes tecnologias apresentadas e das baterias de Lítio têm uma maior densidade de energia e são também as mais leves e que apresentam um perfil mais reduzido [34]. Outro aspeto a evidenciar é o facto

<sup>2</sup> Custo mínimo apresentado em <http://pt.farnell.com/> em 19/09/2015.

de estas baterias conterem lítio no seu interior. Por um lado, o lítio garante um peso reduzido e um tempo de vida elevado, porém, é altamente tóxico e inflamável, devido ao seu caráter químico. O lítio não deve ser exposto a temperaturas excessivamente elevadas por poder dar origem a chamas, caso a temperatura se aproxime da sua temperatura de fusão (180°C) [35].

Como a bateria não será reutilizada o seu custo deve ser tido também em consideração, verificando-se que as que apresentam um custo mais reduzido são as pilhas de Níquel Cádmio e as pilhas de Níquel Hidreto Metálico.

Relativamente à resistência interna, sabe-se que quanto menor for o valor que a bateria apresente neste parâmetro, maior será a corrente disponibilizada pela mesma. [35]

Assim sendo, considerando os vários integrados constituintes do projeto completo da espoleta construíram-se as Tabelas 12 e 13 que permitiram, juntamente com a Tabela 11, selecionar a bateria mais adequada para o sistema.

*Tabela 12 - Gamas de alimentação dos integrados*

<b>Integrado</b>	<b>Tensão de alimentação</b>
<b>Acelerómetro</b>	1,8 – 3,6V
<b>Amplificador</b>	±4 - ±18 V
<b>Monoestável</b>	0,5 - 7 V
<b>Microcontrolador</b>	1,8 - 5,5 V
<b>Comunicação</b>	2,2 - 5,5V

*Tabela 13 - Corrente de alimentação dos integrados*

<b>Grupo</b>	<b>Energia</b>				<b>Sensores</b>			<b>Bluetooth</b>	<b>Controlador</b>
<b>Integrado</b>	TLE2426	LM317	LM7805	ADXL327	LM324	LM556	LM555	RN-41	ATMEGA328
<b>Corrente</b>	300µA	1.5mA	3mA	350µA	50mA	12mA	3mA	100mA	9mA
<b>Total</b>	<b>179.15mA</b>								

A bateria pode ter uma tensão de pelo menos 6V pois este valor permitirá que se proceda aos devidos ajustes de níveis de tensão que se revelem necessários. Porém também devemos ter em consideração a capacidade da mesma, já que os integrados necessitam de uma determinada corrente de alimentação. Pela Tabela 13 sabemos que a capacidade da bateria /escolhida deverá ser superior ao total obtido.

De forma a facilitar a esta escolha, constitui-se a Tabela 14, onde se apresentam vários valores de tensão, a capacidade, o custo associado a cada pilha da tecnologia escolhida, bem como a quantidade necessária para o projeto.

Tabela 14 - Comparação das pilhas de Níquel Hidreto Metálico

Tensão	Capacidade	Quantidade necessária	Custo por unidade	Custo estimado
<b>2.4V</b>	250mAh	3 (série)	€6.67	€20.01
<b>3.6V</b>	700mAh	2 (série)	€7.23	€14.46
<b>4.8V</b>	510mAh	2 (série)	€17.15	€34.3
<b>6V</b>	300mAh	1	€10.72	€10.72
<b>8.4V</b>	150mAh	2 (paralelo)	€10.51	€21.02
<b>9V</b>	170mAh	2 (paralelo)	€14.46	€28.92

Através da Tabela 14 é possível concluir que a opção mais economicamente viável seria a escolha da bateria de 6V. Porém, como já verificado anteriormente, existe a necessidade de criar uma referência e alimentação simétrica para todo o circuito e assim sendo optou-se por empregar uma bateria de 9V.

### 2.1.3.2 Energia do Acionamento

O acionamento da munição requer um sistema que disponibilize uma quantidade de energia considerável, num determinado momento, para que o tempo definido seja respeitado.

Sabendo que a potência é dada pelas seguinte expressão:

$$P = \frac{E}{t} = V \times I \quad (6)$$

onde E é a energia em Joule e t é o tempo durante o qual a energia está a ser aplicada, podemos concluir qual a potência necessária para os vários processos de acionamento descritos. Desta forma, obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 15 - Potência associada a cada processo de acionamento

Processo	Energia	Duração	Potência
<b>EBW</b>	250 mJ	2 µs	125000 W
<b>EFI</b>	250 mJ	0,5 µs	500000 W
<b>SB</b>	5 mJ	2 µs	2500 W

Perante os resultados explanados na Tabela 15 e a descrição feita para cada método no ponto 2.2.2 conclui-se que o método mais adequado é o descrito no relatório da NATO, onde é referido que são necessários 28V e 0,5A na fonte, isto é 14W. Este método necessita de uma quantidade de energia muito menor do que outros apresentados, e também apresenta custos mais reduzidos.

Para que tal potência seja conseguida será projetado um conversor dc-dc elevador, alimentado por uma bateria de 12V, cujas especificações se encontram na Tabela 16.

Tabela 16 - Características da pilha utilizada no conversor

	Tensão Nominal	Capacidade	Autodescarga por ano	Dimensões
<b>GP23AE</b>	12V	59 mAh	10%	Ø10.22mmx28.5mm

Com os dados expressos na Tabela 16 podemos ainda obter a potência da pilha, dada pela expressão (7), onde  $P$  é a potência, dada em Watt,  $V$  a tensão nominal da pilha, em Volt, e  $A$  é a capacidade da mesma, em Ampére.

$$P = V \times A \quad (7)$$

Substituindo os valores da Tabela 16 na expressão (7) obtemos uma potência de 0.708W para esta pilha. Sabemos ainda que a energia consumida por um sistema,  $E$ , expressa em Joules, é dada pela expressão (8), onde  $P$  é novamente a potência e  $t$  é um periodo de tempo, em segundos.

$$E = P \times t \quad (8)$$

No trabalho expresso em [7] é referido que, para um alcance entre 3 e 4km, para que a munição seja acionada a 20m do solo, os tempos de voo do projétil variam de 19,27s a 32,50s, consoante o valor do ângulo de lançamento utilizado.

Assim, podemos verificar que a bateria pode disponibilizar uma energia máxima de 2548.8J em 1 hora, mas como o tempo máximo de voo é apenas 32.5s, a energia que esta gasta, fornecendo 55mA ao circuito, é de apenas 23.01J, que permite concluir que a pilha poderá ainda fornecer uma grande quantidade de energia antes de se consumir. A relação entre a potência e a energia associadas ao tempo de voo e a 1h de consumo encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Relação entre potência e energia da pilha de 12V

Potência Pilha [W]	Intervalo de Tempo [s]	Energia [J]
0.708 W	1 [h] = 60×60[s]	2548.8 J
	32.5s	23.01 J

### 3. Sistema Eletrónico Proposto e Resultados

Este capítulo destina-se a descrever os circuitos projectados e os materiais e equipamentos envolvidos para cada bloco funcional descrito anteriormente. Durante este processo surgiram modificações ao plano de projeto inicial devido a imprevistos e situações não consideradas inicialmente, que originaram algumas correções, todas elas devidamente explicadas.

Neste capítulo, à semelhança do capítulo anterior, são apresentadas algumas das características consideradas mais relevantes dos integrados utilizados. Para se obter mais informações acerca dos mesmos poder-se-á consultar os Anexos, no final do presente documento.

#### 3.1 Sensor de Aceleração

##### 3.1.1 Acelerómetro

Este grupo de integrados tem como objetivo a amplificação e preparação para transmissão do sinal proveniente do acelerómetro. Como tal, foram abordados os vários componentes separadamente.

A montagem de teste do acelerómetro consistiu na utilização do pin 2 do integrado, *Self Test*, que é ligado à tensão de alimentação que se está a fornecer. As saídas nos vários eixos foram idênticas ao valor especificado na *datasheet*, como esperado.

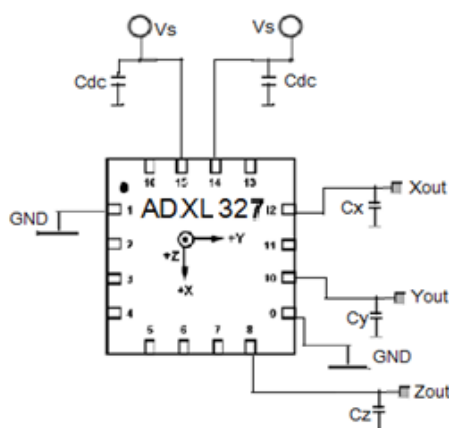


Figura 18 - Montagem do acelerómetro

A montagem a utilizar para o projeto, expressa na Figura 19, necessita do ajuste dos valores dos condensadores de saída para uma largura de banda adequada, como referido no capítulo anterior. Os dois condensadores de desacoplamento  $C_{dc}$  não são essenciais à montagem, uma vez que a alimentação é feita por baterias.

Os valores dos condensadores utilizados têm os valores expressos na Tabela 18.

*Tabela 18 - Valores dos condensadores da montagem do acelerómetro*

Condensador	Valor
<b>C<sub>dc</sub></b>	1µF
<b>C<sub>x</sub></b>	0.01µF
<b>C<sub>y</sub></b>	0.01µF
<b>C<sub>z</sub></b>	0.01µF

Como já referido, os condensadores C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub> e C<sub>z</sub> permitem alterar a largura de banda do acelerómetro. Este valor é importante, pois sabe-se que a largura de banda é a característica do circuito dentro da qual os sinais são transmitidos sem sofrer atenuação significativa, e é medida no ponto onde o sinal decai a -3dB abaixo da banda de passagem. Assim sendo, com os valores da Tabela 18,  $f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi(32k)C_{x,y,z}} = \frac{5\mu F}{C_{x,y,z}}$ , obtém-se as seguintes larguras de banda:

*Tabela 19 - Largura de banda dos eixos do acelerómetro*

Eixo	Largura de Banda
<b>X</b>	500Hz
<b>Y</b>	500Hz
<b>Z</b>	500Hz

Ainda antes de se trabalhar o sinal de saída do integrado, este teve que ser estudado para se saber até que ponto as suas características irão afetar os resultados obtidos. Inicialmente, focámo-nos no estudo do *offset*, para verificarmos o valor que os vários eixos apresentam na saída na ausência de sinal de entrada e no estudo da saída quando o integrado é sujeito a uma aceleração segundo um determinado eixo. Este último ponto referido não foi efetuado nas condições ideais, no sentido em que não foi possível simular as condições extremas do disparo da munição.

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam o *offset* medido para cada eixo. Nos eixos X e Y este tem um valor de aproximadamente 1V, enquanto para o eixo Z mediu-se cerca de 1,3V. Estes valores encontram-se próximos dos valores apresentados na *datasheet*, que apresenta como valor típico 1,5V para cada eixo.



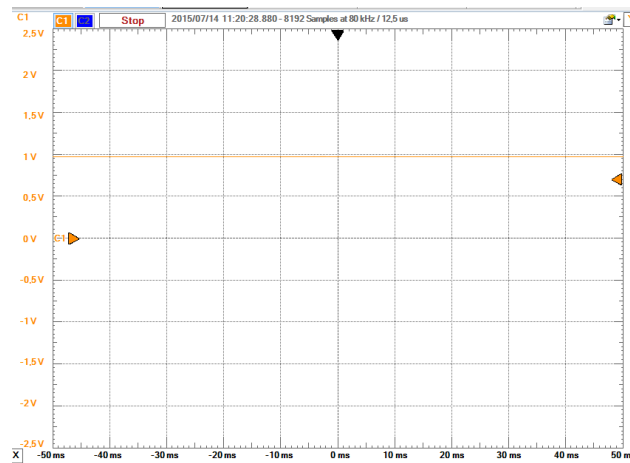


Figura 19 - Offset do eixo X

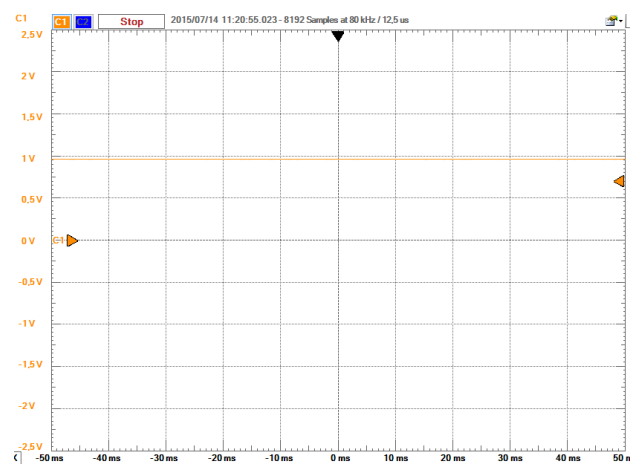


Figura 20 - Offset eixo Y

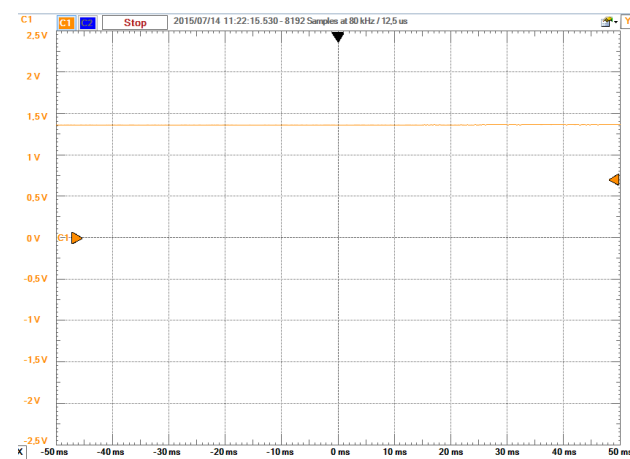


Figura 21 - Offset do eixo Z

O movimento do acelerómetro foi testado através de uma montagem inserida num pêndulo, que está apresentada na Figura 23.

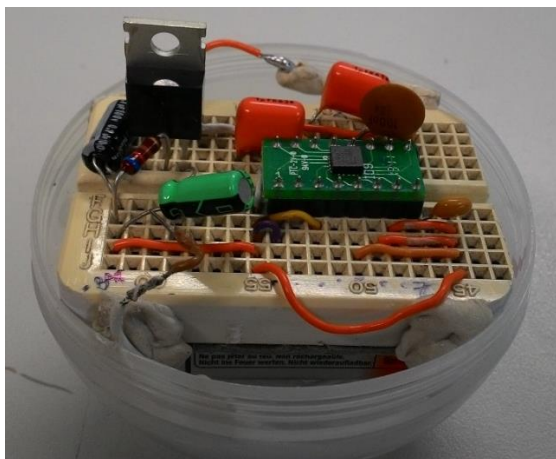


Figura 22 - Montagem do acelerômetro alimentado a bateria, inserida num pêndulo

O circuito apresentado acima corresponde ao circuito proposto, alimentado com uma bateria com tensão nominal de 9V, que é adaptada para a tensão de alimentação do acelerômetro, nesta aplicação utilizou-se 3V, através do regulador de tensão LM317. O objetivo desta experiência é estimular o circuito a variadas e diferentes acelerações a fim de se conseguir caracterizar o comportamento de saída.

O pêndulo, constituído por um cabo de aço, mede 1,17m e foi lançado a partir do repouso dos seguintes ângulos: 30°, 45°, 60° e 90°. Também foi medido o valor que a saída dos vários eixos apresentava estando em repouso, o que coincide com *offset* de cada eixo, já visto anteriormente. Para cada lançamento feito foram recolhidas 10000 amostras num osciloscópio digital. A Figura 24 esquematiza o procedimento adotado para a recolha de dados.

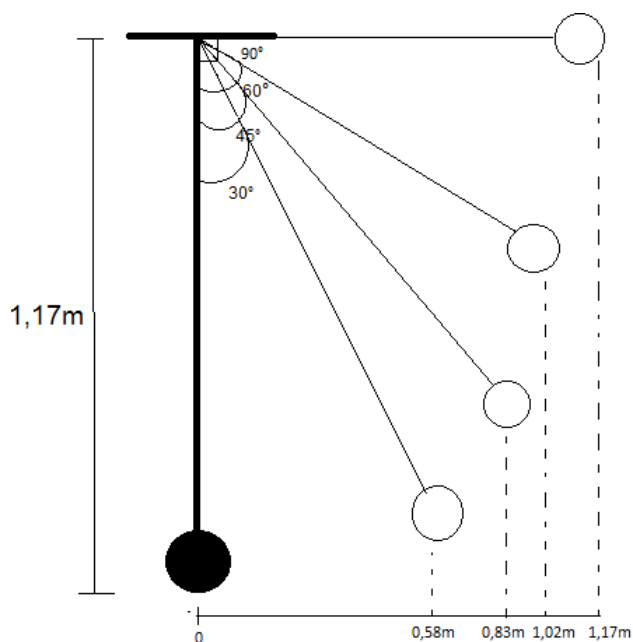


Figura 23 - Esquema da experiência

A partir dos resultados obtidos foi possível realizar os gráficos presentes nas Figuras 25, 26 e 27:

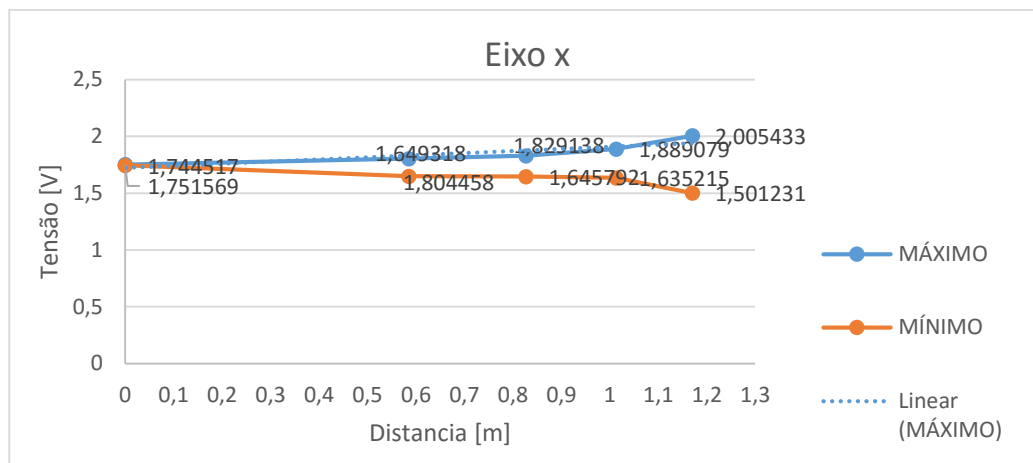


Figura 24 - Saída do eixo X para as várias distâncias

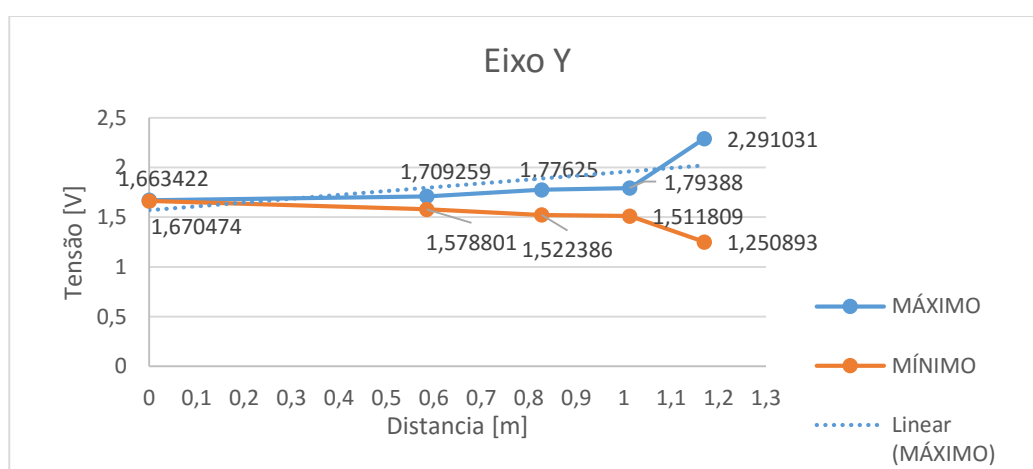


Figura 25 - Saída do eixo Y para as várias distâncias

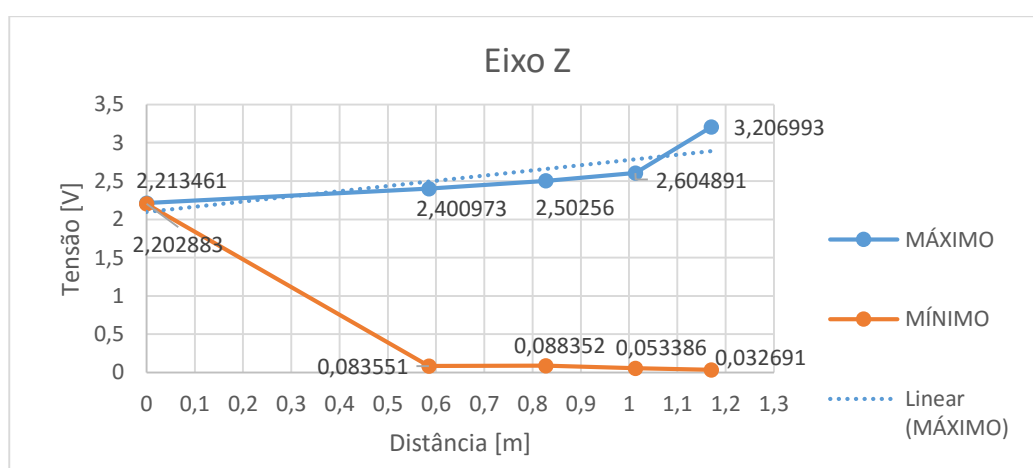


Figura 26 - Saída do eixo Z para as várias distâncias

Como seria expectável, para o repouso, isto é, para a distância 0, os valores mínimo e máximo são bastante próximos e o valor de tensão máxima aumenta com o aumento do ângulo em que foi feito o lançamento. Os eixos X e Y apresentam valores máximos próximos, contudo, é no eixo Z que se verificou o maior diferencial medido.

Os valores máximos registados no conjunto de todos ensaios realizados encontram-se na Tabela 20:

Tabela 20 - Máximos obtidos com a experiência do pêndulo

Eixo	X	Y	Z
Tensão de saída	2,80V	3,10V	3,20V

Com base na Tabela 20 vamos usar como pressuposto que para acelerações bruscas o sinal de saída do acelerómetro atinge no mínimo 3V.

Foram também registadas imagens da variação que o osciloscópio apresentava ao dar-se um impulso no pêndulo, Figuras 28, 29 e 30:

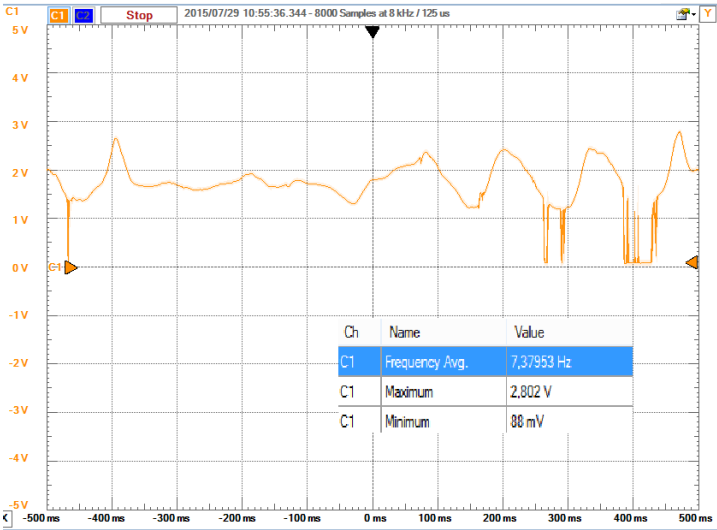


Figura 27 - Saída X face a um impulso

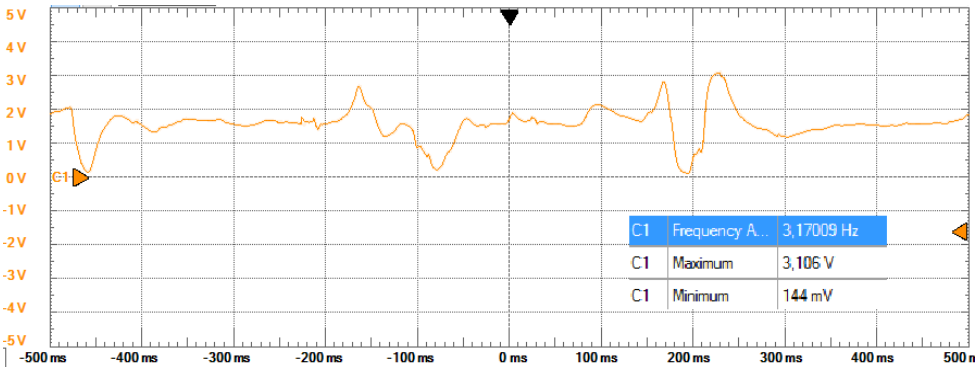


Figura 28 - Saída Y face a um impulso

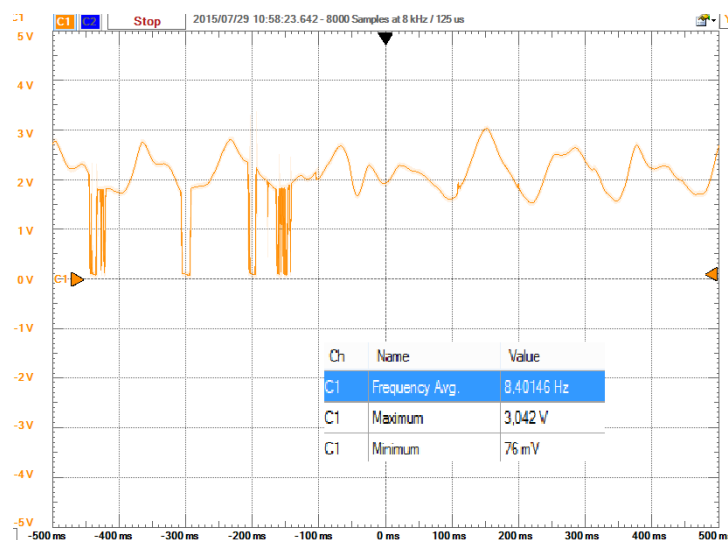


Figura 29 - Saída Z face a um impulso

As Figuras 28, 29 e 30 fazem ainda referência ao valor da frequência dos valores medidos. Porém, para se fazer a caracterização de um sinal vibratório deve recorrer-se a outras ferramentas, como por exemplo a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Densidade Espectral de Potência (PSD).

Através do osciloscópio implementou-se a FFT. O objetivo da implementação da FFT passa por determinar as frequências do movimento oscilatório para cada um dos eixos, neste caso, de um movimento brusco e com direções alternadas. Como se sabe, a munição terá que ser manuseada até ser colocada no obus, e durante este processo que envolve movimentações não é suposto que o de acionamento seja iniciado. Porém os resultados obtidos não foram conclusivos.

Com base nos valores que deveríamos ter adquirido no processo acima descrito poder-se-ia então estabelecer valores limites para os quais não queremos que ocorra a ativação involuntária da munição. Como tal não foi possível, a montagem foi inserida numa estrutura deslizante com rodas, como se verifica pela Figura 31, a fim de facilitar o seu movimento para encontrar um valor adequado para a frequência de corte do filtro

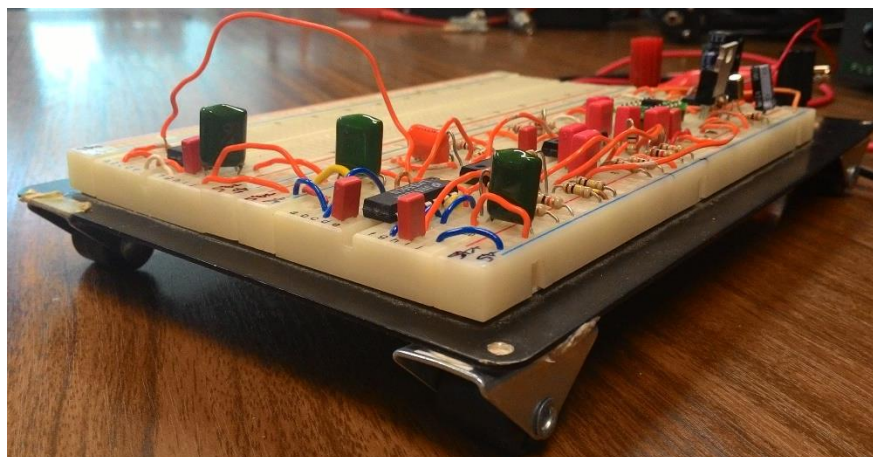


Figura 30 - Montagem com rodas

### 3.1.2 Filtro

Sabemos que a aceleração a que a munição estará sujeita será muito superior aos valores máximos aqui detetados, e que no processo de preparação da munição esta não será movimentada tão rapidamente como foi através da estrutura do protótipo da Figura 33. Assim, podemos assumir que a frequência de corte do filtro será 1kHz, o que garante que pequenos movimentos não acionem a munição e permite a verificação que o circuito está a funcionar corretamente.

Segundo um documento da *Analog Device* sobre MEMS [36], conseguimos estabelecer uma relação direta entre a aceleração e a frequência do movimento vibratório detetado pelo componente, o que nos assegura, que um filtro passa alto, com a frequência de corte referida é adequado. A vibração é definida como uma oscilação em torno de uma posição inicial, o que nos permite obter a velocidade e a aceleração através de acelerómetros MEMS. Através do uso de sucessivas primitivas podemos realizar a seguinte dedução para concluir sobre a velocidade e o deslocamento:

$$a(t) = A \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$v(t) = \int a(t) dt = \frac{A}{\omega} \cos(\omega t) + v_0 \quad (10)$$

$$x(t) = \int v(t) dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t) + x_0 \quad (11)$$

Assumindo que a velocidade inicial e a posição inicial são nulas e que o deslocamento é um valor positivo, obtemos:

$$|x| = \left| \frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t) \right| \rightarrow A = x(2\pi f)^2 \quad (12)$$

E com a equação (12) podemos concluir que quanto maior for a aceleração sofrida maior será a frequência associada ao movimento. Assim sendo, reforça-se que a utilização do filtro passa-alto impedirá que ao movimentar-se a munição esta seja acionada indevidamente e que a sua utilização não compromete a deteção da saída do tubo do obus, pois a aceleração nesse ponto é muito elevada.

Como referido no capítulo anterior, será utilizada uma secção de 2ª ordem *Sallen-Key*. A Figura 32 esquematiza uma das secções desenvolvidas.

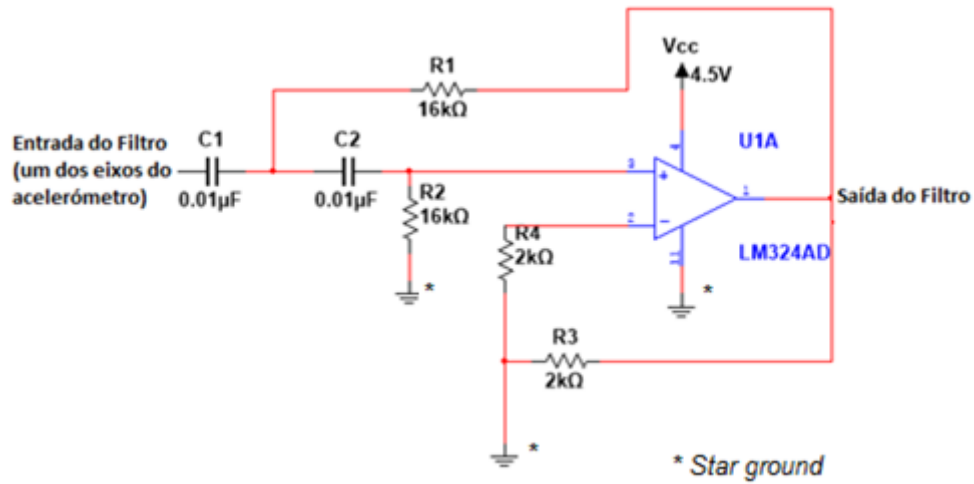


Figura 31 - Filtro passa alto

O amplificador utilizado para a concretização da montagem é o LM324, que apresenta como principais vantagens o facto de permitir alimentação assimétrica e integrar quatro amplificadores.

Como parâmetros para o seu dimensionamento estipulou-se a frequência de corte, já referida,  $f_c = 1kHz$  e o fator de qualidade,  $Q = 1$ . Recordando a Função de transferência dos filtros passa alto de segunda ordem,  $H(s)$ :

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{ks^2}{s^2 + s\frac{w_0}{Q} + w_0^2} = \frac{2s^2}{s^2 + 6283.185s + 39478417.6} \quad (13)$$

$$k = \frac{R3 + R4}{R4} = 2 \quad (14)$$

Para este caso, o ganho K, definido pela expressão (14), é 2 e a frequência é dada por  $w_0 = 2\pi f_c$ .

Para o cálculo dos componentes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$  e  $R_2$ , assume-se que os condensadores têm ambos o mesmo valor e para as resistências procede-se da mesma forma, simplificando os cálculos. Assim sendo, estes componentes podem ser calculados através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R^2C^2}} \quad (15)$$

Recorrendo a condensadores de 10nF e resistências de 16k, podemos recalcular a frequência de corte do filtro e a sua função de transferência:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R^2C^2}} = 994,72 \text{ Hz} \quad (16)$$

$$H(s) = \frac{2s^2}{s^2 + 6250s + 39062500} \quad (17)$$

A função de transferência permite, através dos diagramas de Bode, verificar se o sistema é estável, como pretendido. Os diagramas de Bode de amplitude e fase da função de transferência (17) encontram-se na Figura 33.

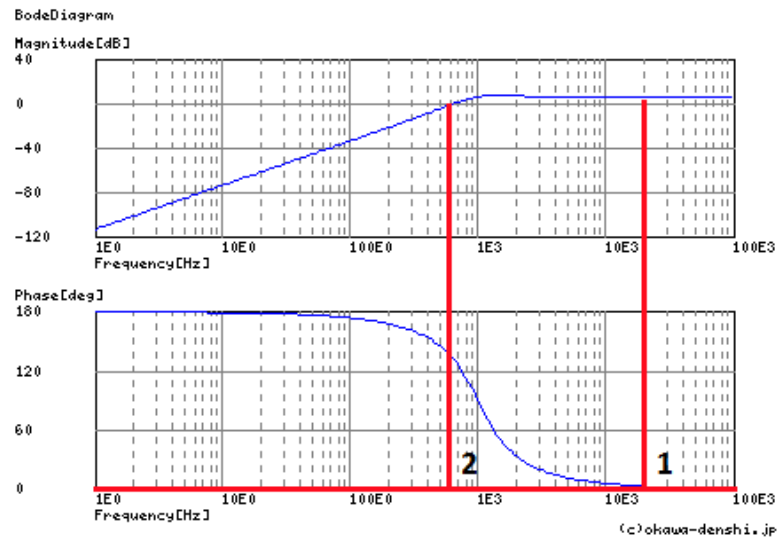


Figura 32 - Diagramas de bode de amplitude e fase da função de transferência do filtro

Através das margens de ganho, e de fase, obtidas da Figura 33, podemos concluir que o sistema é estável, o que seria de esperar num sistema de 2ª ordem.

O estudo do comportamento do filtro consistiu em analisar-se o seu *offset* e a sua saída perante um sinal de entrada com 1V de amplitude e frequência variável. Os resultados obtidos encontram-se ao longo das próximas figuras.

A Figura 34 é referente ao *offset* do filtro. Verifica-se que na ausência de um sinal de entrada o filtro apresenta um sinal com 193mV de amplitude.

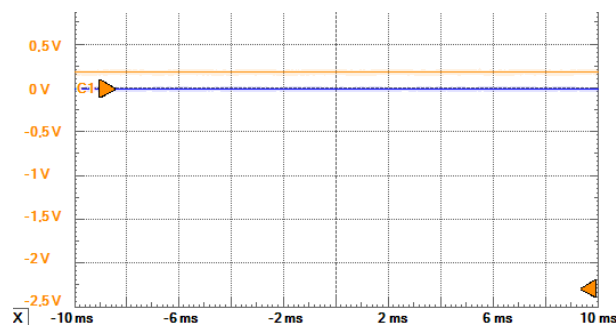


Figura 33 - Saída do filtro (laranja) com sinal de entrada nulo (azul)



A Figura 35 apresenta a saída do filtro (laranja) quando a entrada (azul) corresponde a um sinal com 1Hz de frequência. Como seria expectável, o sinal de entrada é atenuado, estando o sinal de saída coincidente com o valor do *offset* verificado anteriormente.

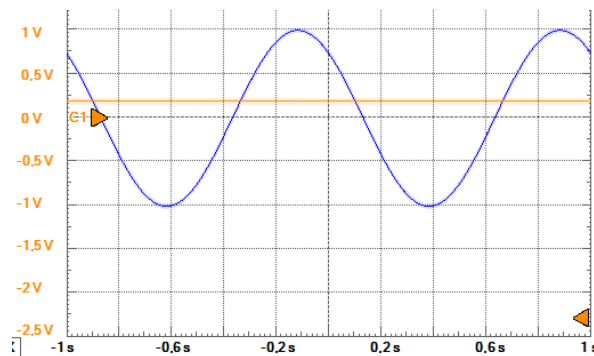


Figura 34 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 1Hz de frequência

Ao aumentar-se a frequência do sinal de entrada para 500Hz, metade da frequência de corte, verifica-se, pela Figura 36, que a saída do filtro aumentou para 260 mV, tendo por tanto a atenuação diminuído.

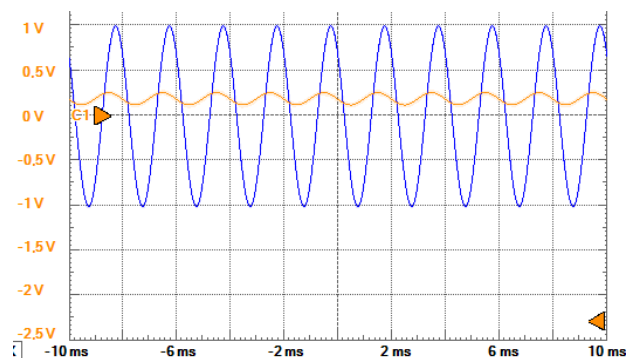


Figura 35 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 500Hz de frequência

Ao colocar-se na entrada do filtro um sinal com 1kHz, na saída obtemos um sinal que atinge no máximo 290mV de amplitude, representado a laranja na Figura 37.

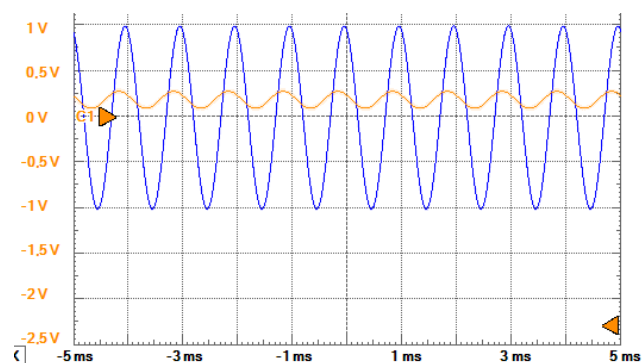


Figura 36 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 1kHz de frequência

No âmbito de se verificar se o comportamento se mantinha para frequências superiores, variou-se a frequência de entrada para 2kHz e para 10kHz, estando os resultados obtidos nas Figuras 38 e 39.

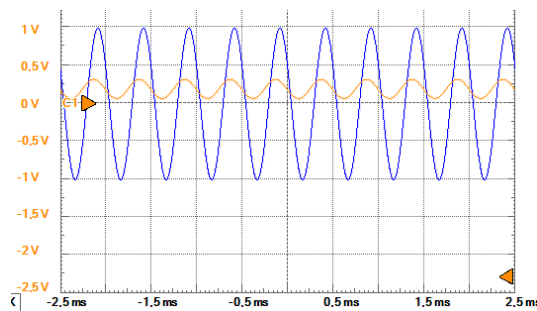


Figura 37 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 2kHz de frequência

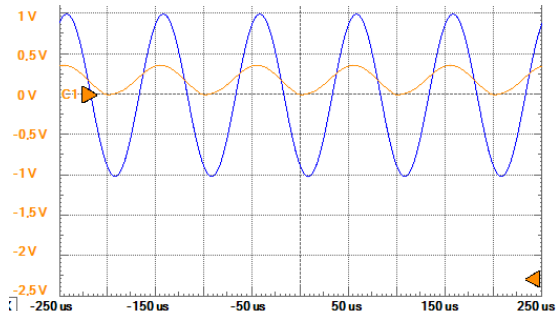


Figura 38 - Saída do filtro (laranja) com entrada (azul) com 10kHz de frequência

Quando a frequência de entrada correspondeu a 2kHz verificou-se que o sinal de saída atingiu 320mV, e para 10kHz chegou aos 375mV. Com esta sequência de sinais de entrada podemos concluir que o filtro mantém o comportamento esperado, não se verificando distorções no sinal de saída e que o sinal que obtemos tem uma amplitude muito baixa e deve ser amplificado.

### 3.1.3 Amplificador

A alimentação de uma grande maioria dos amplificadores é frequentemente simétrica. Porém, de forma a facilitar a constituição do bloco que irá alimentar os vários circuitos, recorreu-se a uma montagem com alimentação assimétrica, onde se verifica a necessidade de existir uma referência, em vez do terminal de tensão negativa. Essa montagem encontra-se esquematizada na Figura 40.

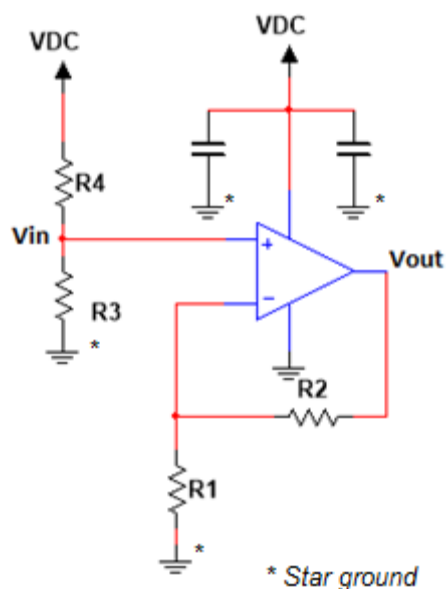


Figura 39 - Esquema do amplificador não-inversor com alimentação assimétrica

O divisor de tensão constituído pelas resistências R4 e R3 deve estar adaptado para que a tensão no ponto médio coincida com a tensão de *offset* do sinal de entrada.

As resistências R1 e R2 contribuem para o ganho do amplificador de acordo com a expressão  $\frac{R2}{R1}$ . Como se trata de uma montagem não inversora o ganho é dado pela equação (18).

$$G = \frac{R2}{R1} + 1 \quad (18)$$

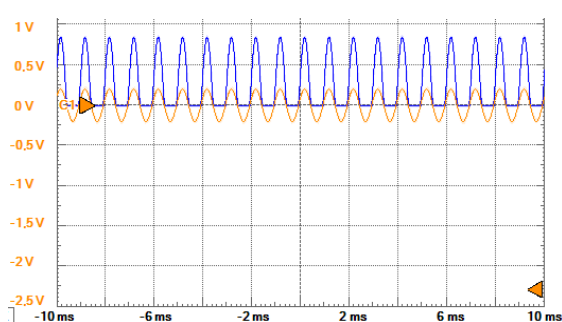
Os valores dos componentes que integram a montagem do amplificador estão especificados na Tabela 21

Tabela 21 - Valor dos componentes do amplificador

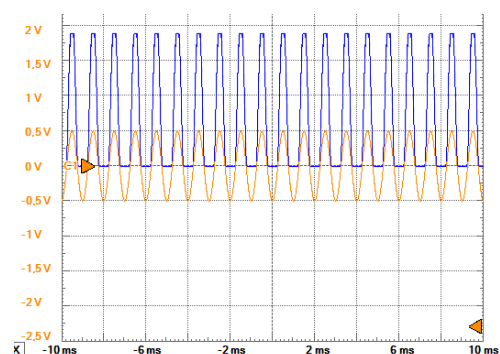
Componente	Valor
R <sub>1</sub>	13KΩ
R <sub>2</sub>	100kΩ
R <sub>3</sub>	100kΩ
R <sub>4</sub>	100kΩ

Através dos valores da Tabela 21 verifica-se que o ganho apenas do amplificador é aproximadamente 8,5. A necessidade de se escolher este ganho prende-se com as baixas amplitudes que a saída do filtro apresenta e com o facto da saída do amplificador ter que ser capaz de acionar o monoestável, caso o sinal o justifique.

O funcionamento experimental do amplificador encontra-se representado nas Figura 43. A azul temos a saída do amplificador e a laranja a entrada do mesmo. Ao inserir-se um sinal na entrada do amplificador, constata-se que a montagem apenas amplifica a componente do sinal que apresente amplitude positiva, o que para esta aplicação não é problemático. Este aspeto pode ser verificado nas Figuras 41 e 42.

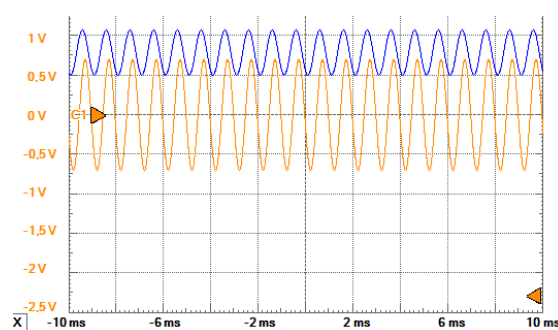


*Figura 40 - Saída do amplificador (azul) para entrada com 200mV de amplitude e 1kHz de frequência (laranja)*



*Figura 41 - Saída do amplificador (azul) para entrada com 500mV de amplitude e 1kHz de frequência (laranja)*

Na Figura 43 analisou-se o comportamento que o amplificador apresentava quando o seu sinal de entrada coincidia com o sinal de saída do filtro, quando a entrada deste último era um sinal com 700mV de amplitude e 1kHz de frequência.



*Figura 42 - Sinal de entrada no filtro (700mV, 1kHz) (laranja) e sinal de saída do amplificador (azul)*

### 3.1.4 Multivibrador Monoestável

Após ser amplificado, o sinal deve produzir um impulso com uma determinada duração caso se verifiquem as condições, quer de frequência, que são asseguradas pelo filtro, como de amplitude, garantidas pelo amplificador. Para se calcular a duração do impulso pode recorrer-se ao gráfico da Figura 44.

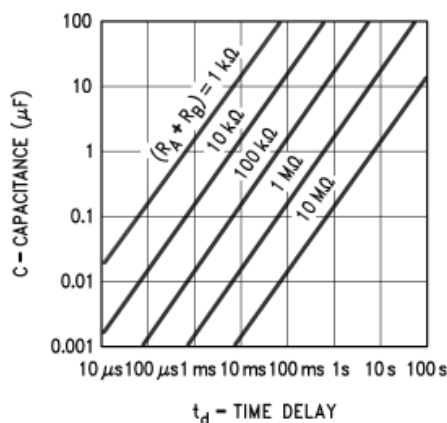


Figura 43 - Relação entre os componentes externos e a duração do impulso do monoestável  
Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>

Com o auxílio da Figura 45 podemos identificar as ligações efetuadas para que o circuito funcione no modo monoestável.

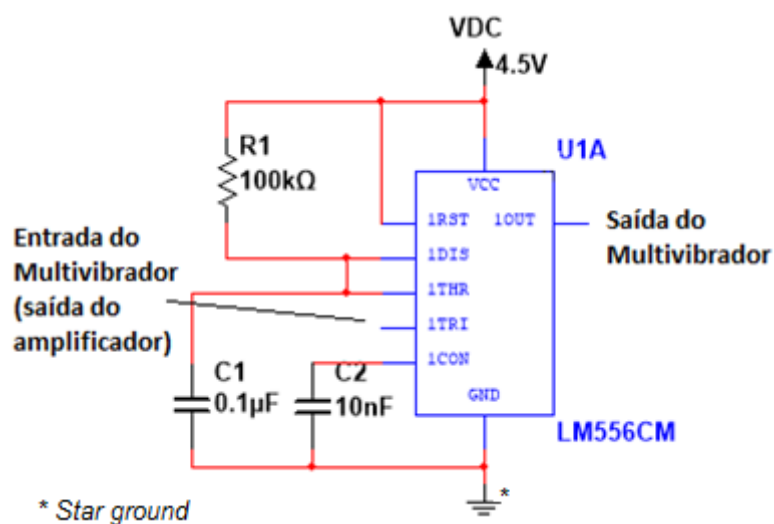
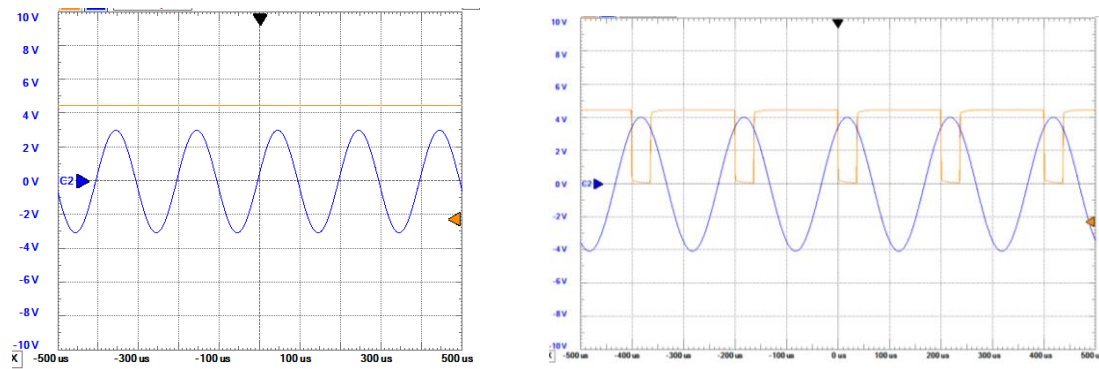


Figura 44 - Circuito do monoestável para um dos eixos

Para a montagem utilizou-se uma resistência de 100KΩ e um condensador com 0.1μF, o que permite concluir, pela Figura 44 que o impulso terá uma duração próxima de 10ms.

Experimentalmente foi obtido o resultado expresso na Figura 45, estando a laranja a onda de saída do monoestável e a azul a onda de entrada.



*Figura 45 - Resultados experimentais do monoestável*

Como referido no capítulo anterior, a saída do monoestável é condicionada pelo valor da amplitude da onda de entrada. Como se pode constatar, para amplitudes inferiores a 3V a saída não sofre alterações, tomando valores nulos enquanto o sinal de entrada apresentar valores superiores a  $\frac{2}{3}V_{DD}$ .

### 3.1.4 Funcionamento Global do circuito

Após o dimensionamento de cada constituinte do bloco 'Sensor de Aceleração', verificou-se o comportamento do conjunto presente na Figura 47:

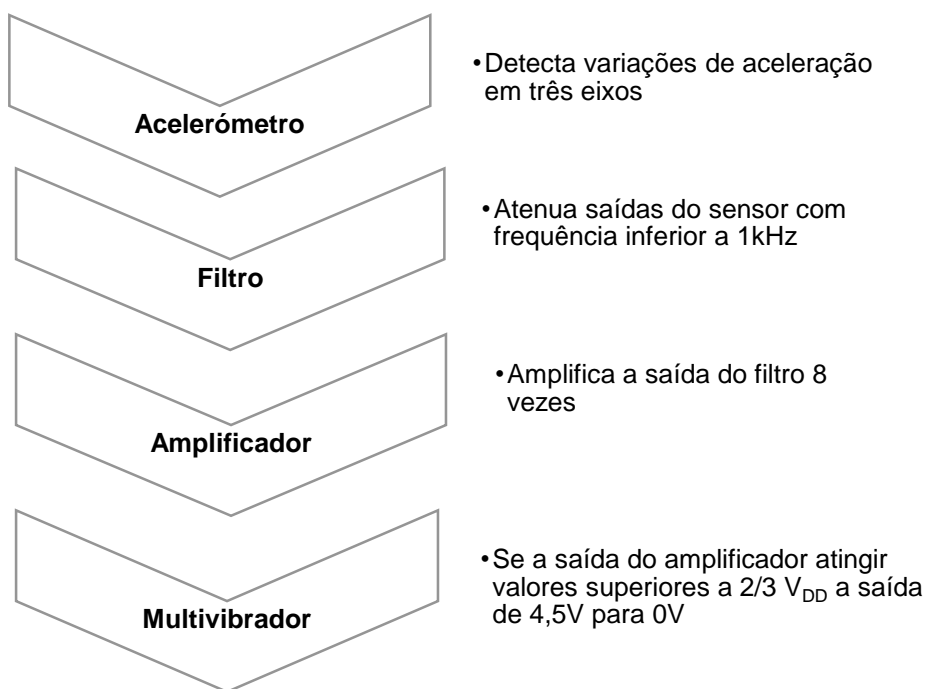


Figura 46 - Esquemática do bloco de condicionamento de sinal do sensor.

Para se realizar este teste sujeitou-se a montagem onde estava inserido todo o circuito a um abanão brusco. De notar que o filtro impede que quase a totalidade dos movimentos que realizámos originem uma saída no sistema. Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 48, 49 e 50.

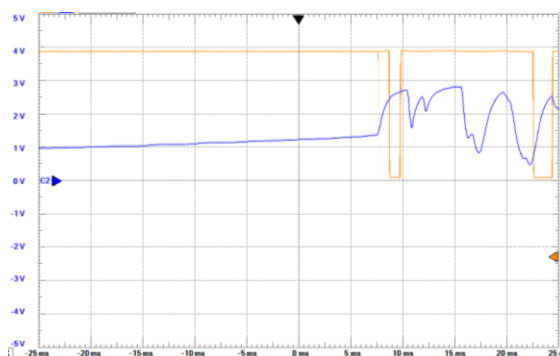


Figura 47 – Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo X (azul) como entrada

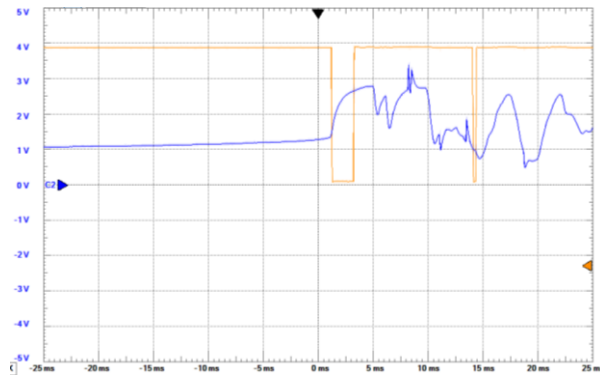


Figura 48 - Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo Y (azul) como entrada

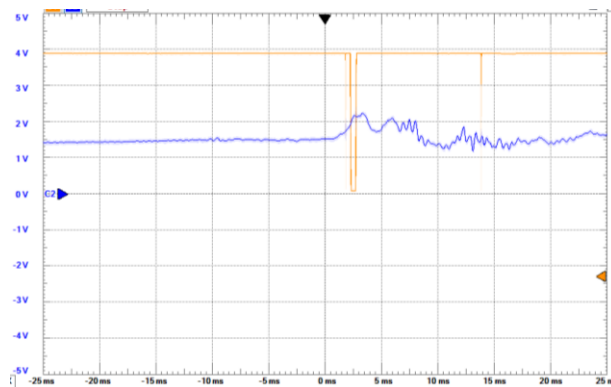


Figura 49 - Saída do sistema (laranja) quando recebe o eixo Z (azul) como entrada

Da análise das Figuras 48, 49 e 50 podemos verificar que o sistema reage como planeado.

É de salientar que nas figuras acima apenas é visualizado o sinal de saída do acelerómetro e o sinal de saída do sistema completo, como tal é possível que sejam visualizadas amplitudes de saída do acelerómetro capazes de acionar o monoestável, mas que devido ao valor que a sua frequência assume, não originem o impulso que seria expectável na saída do multivibrador. Assim conclui-se que o sistema trabalha corretamente e que apenas os sinais que cumpram os requisitos aqui referidos a nível de amplitude e frequência conseguirão originar o impulso à saída do sistema. É também importante referir que assim que as características do sinal de entrada se alteram e as condições mínimas estabelecidas não se verifiquem mais, a saída do monostável volta a estar no nível alto e não é emitido mais nenhum impulso até que as condições para tal se repitam.

Deste sistema são originados três sinais, um para cada eixo, que são enviados para o controlador. Quando o controlador os detetar e verificar que as condições que foram definidas para identificar a saída da munição do tubo do obus deve então dar início à contagem do tempo de voo, para que o acionamento ocorra na altura desejada.

O esquema completo do circuito e os respetivos componentes utilizados podem ser consultados nos anexos.



### 3.2 Gestão de Energia do Sistema

Como referido anteriormente, este bloco funcional tem que ser capaz de alimentar os vários circuitos e é independente do sistema de acionamento da munição.

Para a realização do circuito que alimentará todos os restantes é importante ter em consideração quais os limites possíveis para a tensão de alimentação dos vários integrados e a corrente necessária, que se encontram discriminados nas Tabelas 12 e 13, no capítulo anterior.

Uma das dificuldades que facilmente se identifica através dessas mesmas Tabelas é que nem todos os integrados exigem uma alimentação simétrica, ou seja existe a necessidade de se criar uma referência a *ground*, já identificada anteriormente com o amplificador. Também podemos verificar que terão que ser criados dois níveis de tensão distintos, nomeadamente 5V, 4,5V e 3V.

Assim sendo, para respeitar os aspetos acima referidos, propõe-se um circuito com um *buffer* para se obter o *ground*, e a aplicação de um regulador de tensão, o que permitirá então obter-se dois níveis de tensão distintos. Todo este sistema seria alimentado através de uma pilha com 9V de tensão e capacidade adequada para alimentar todos os integrados.

Na Figura 51 propõe-se o circuito que inclui a bateria e o *buffer* TLE2426, cujas características se encontram na Tabela 21. Este *buffer* irá receber no pino 3 (IN) a tensão positiva da bateria e no pino 2 (COM) a tensão negativa, funcionando como um divisor de tensão, obtendo dois valores de tensão (+4,5V e -4,5V) e a referência a *ground*. Este circuito alimentará todos os blocos, excepto o acelerómetro e o módulo de comunicação *bluetooth*.

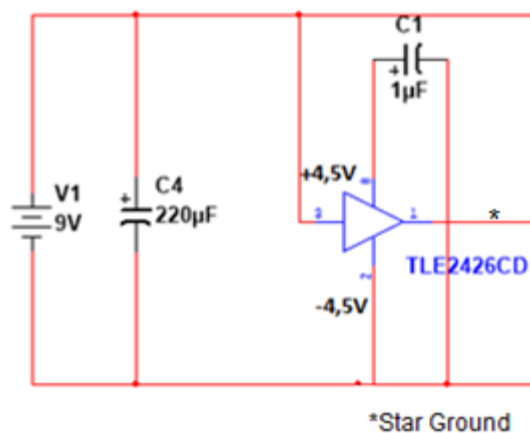


Figura 50 - Circuito para criar referencia a *ground*

O condensador C<sub>1</sub> deve ser adicionado para reduzir o ruído, aumentando a precisão da saída.

Tabela 22- Características do buffer TLE2426

	Limites de tensão	Limite de Temperatura	Corrente de saída
<b>TLE2426</b>	4 a 40V	0° a 70°C	±80mA

Segundo a Tabela 13, onde se apresentava a estimativa de corrente necessária para os vários blocos do sistema, podemos verificar que o módulo de comunicação exige uma corrente superior à que o buffer TLE2426 pode fornecer, havendo por isso necessidade de se utilizar um regulador de tensão LM7805, cujo circuito se encontra na Figura 52.

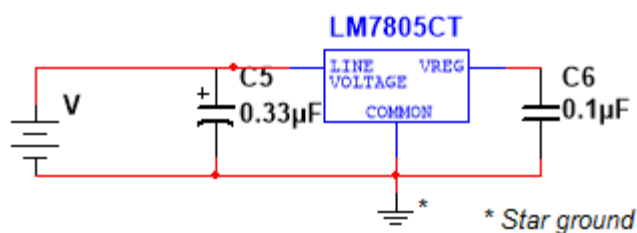


Figura 51 - Circuito regulador

Como este regulador tem uma corrente de saída até 1,5A, será capaz de fornecer a alimentação necessária, em tensão e em corrente ao módulo *Bluetooth*.

Já para se proceder à adaptação do nível de tensão que irá alimentar o acelerómetro utilizou-se o regulador de tensão LM317, tendo sido a sua saída regulada para 3V. A montagem adotada é a que se encontra na Figura 53.

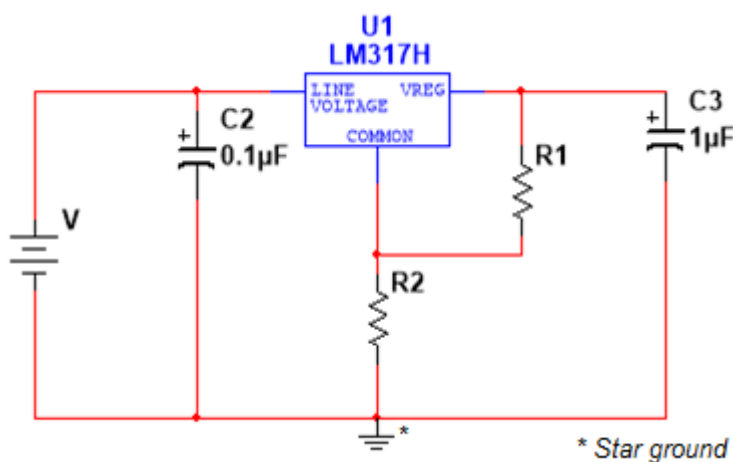


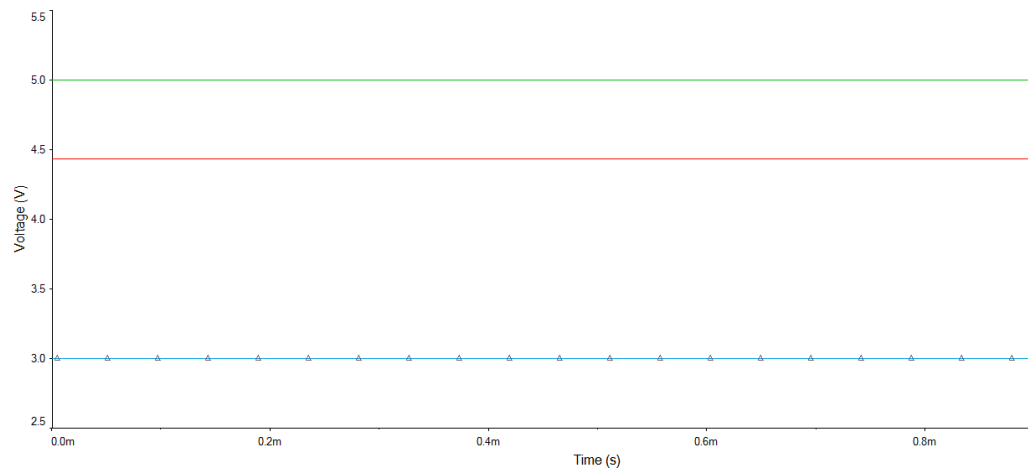
Figura 52- Circuito para adaptar os níveis de tensão para 3V

De acordo com as especificações da *datasheet*, é necessário a utilização de dois condensadores e duas resistências que permitirão ajustar o valor da tensão de saída, como se pode verificar na Figura 53. Essa regulação é feita com base na expressão (19) que também poderá ser encontrada na *datasheet* do integrado.

$$V_{out} = 1.25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (19)$$

Sabendo que pretendemos ter na saída uma tensão de 3V, e considerando que R1 toma o valor de 1kΩ, pela expressão (19) concluímos que R2 tem 1,4kΩ.

Para alimentar os circuitos irá utilizar-se os 4,5V obtidos através do buffer, excepto o módulo de comunicação que será alimentado através dos 5V e o acelerómetro, alimentado por 3V, obtidos na saída do regulador de tensão LM317. A Figura 54 mostra as saídas geradas pelo conjunto acima descrito, estando representada a vermelho a saída do circuito da Figura 51, a verde a saída obtida pelo circuito da Figura 52 e a azul o circuito da Figura 53.



*Figura 53 - Dois níveis de tensão regulados*

O circuito final deste grupo e algumas características dos componentes utilizados podem ser consultados em anexo.

### 3.3 Acionamento

O objetivo deste bloco funcional, como dito anteriormente, é conseguir fornecer a energia necessária e atempadamente para que ocorra o acionamento da munição.

No capítulo anterior foram abordadas várias formas que poderiam ser utilizadas para se conseguir o acionamento da munição, porém como não foi especificado nenhum tipo concreto de acionamento para o projeto optou-se por se realizar o método que não requeria nenhum tipo de explosivo. Assim sendo, o propósito desta parte é conseguir gerar na carga uma tensão de 28V e uma corrente de 0,5A, o que faz uma potência de 14W. Existem outros métodos apresentados no capítulo 2 que requerem potências mais elevadas, porém, este é o mais adequado por não necessitar de uma carga explosiva.

Apresenta-se de seguida a escolha dos vários elementos, bem como o dimensionamento do conversor dc-dc elevador (conversor *boost*) e do seu circuito de controlo, e as respetivas simulações. Para o dimensionamento do conversor elevador houve algumas considerações que tiveram que ser feitas, nomeadamente o valor da tensão na saída  $V_o$ , que se considerou  $V_o = 28V$ , o valor da tensão da bateria  $U_o$ , que se considerou  $U_o = 12V$  e a frequência de comutação  $f_s = 20KHz$ . Foi também considerado que a variação da tensão de saída é de 5% e que a variação da corrente na bobina é de 1%. O valor da indutância foi também limitado a 1mH.

Considerando o sistema ideal, comecemos então por calcular o duty-cycle,  $\delta$ , para o conversor:

$$\delta = 1 - \frac{U_o}{V_o} = 1 - \frac{12}{28} = 0.57 \approx 0.6 \quad (20)$$

Como se considera que não há perdas, podemos estabelecer a seguinte relação entre a energia que sai,  $P_o$ , e que entra,  $P_i$ , no sistema:

$$P_o = P_i = 14W \quad (21)$$

Sabendo qual o valor de  $P_i$  devemos verificar qual o valor da corrente de entrada,  $I_i$ :

$$P_i = V_i \times I_i \rightarrow I_i = \frac{14}{12} = 1,2A \quad (22)$$

Com este último valor obtido podemos finalmente calcular o valor do condensador:

$$C = \frac{I_o \times \delta}{f_s \times \Delta V_o} = \frac{0.5 \times 0.6}{20k \times 0.05 \times 28} = 10.7\mu F \quad (23)$$

Com base nestes valores, e após o ajuste da capacidade do condensador para 10 $\mu$ F, o circuito que obtemos encontra-se na Figura 55:

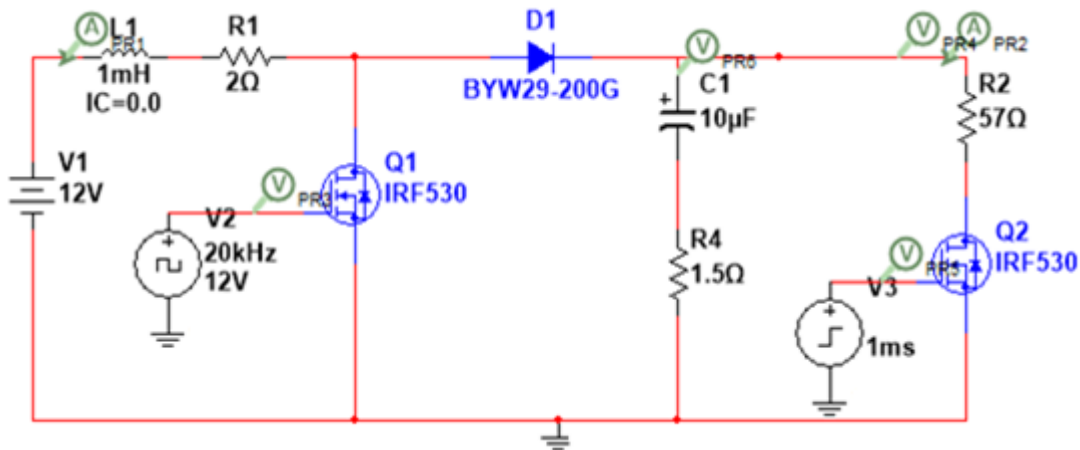


Figura 54 - Conversor boost

O transistor 2 que pode ser observado na Figura 55 é um componente que receberá um impulso externo, proveniente de um controlador, que permitirá fazer a descarga da energia acumulada. O objetivo da introdução deste semiconductor em série com a resistência é simular um engenho pirotécnico que, ao ser percorrido por um valor de corrente elevado originado por um sinal de potência, irá permitir a abertura da munição.

A bobina utilizada no circuito apresentava uma resistência interna de 2 $\Omega$ , e está representada no circuito de simulação através de R<sub>1</sub>, e o condensador apresentava 1,5 $\Omega$ , também representada do circuito através de R<sub>4</sub>.

Foi empregue o IRF530 para comutar o conversor e para a carga. Trata-se de um transistor MOSFET, de canal n, que apresenta características que garantem margem para que o seu funcionamento não seja alterado perante os valores de corrente e tensão que podem ser atingidos no conversor. Na Tabela 23 encontram-se os valores referentes à tensão dreno-fonte, V<sub>DS</sub>, à corrente do dreno, I<sub>D</sub>, à tensão porta-fonte, V<sub>GS</sub>, à tensão de limiar, V<sub>GS(TH)</sub>, a gama de temperaturas de funcionamento do integrado, T<sup>o</sup>, e a resistência do mesmo quando está na região de tródo, r<sub>ds ON</sub>.

Tabela 23 - Características do IRF530

V <sub>DS</sub>	I <sub>D</sub>	V <sub>GS</sub>	V <sub>GS(TH)</sub>	T <sup>o</sup>	r <sub>ds ON</sub>
100V	14 A	20V	2 a 4V	-55 a 175° C	0.14 $\Omega$

Quando ao diodo, utilizou-se o BYW29, cujas características se encontram expressas na Tabela 24, nomeadamente a corrente máxima directa, V<sub>RRM</sub>, a tensão inversa de disrupção e a gama de temperaturas de funionamento que este dispositivo suporta, T<sup>o</sup>. É novamente possível verificar que os limites suportados por este dispositivo são muito superiores aos valores de tensão e corrente atingidos pelo conversor, o que garante que o componente não irá ser danificado.

Tabela 24 - Características do diodo BYW29

$I_F$	$V_{RRM}$	$T^{\circ}$
16A	200V	-65 a 175° C

O resultado desta simulação encontra-se explanado e devidamente discutido nas próximas imagens.

Os testes do conversor elevador foram baseados em dois aspetos, a carga e a frequência. Numa primeira análise, serão apresentados os resultados obtidos com a carga com se apresenta na Figura 55, sendo depois referida a tensão no condensador, quando não existe carga. Numa segunda fase, será feito o estudo da frequência de comutação do sistema, que deve assegurar os valores desejados para  $20KHz \pm 20\%$ .

A Figura 56 mostra as correntes na bobina, a vermelho, e na carga, a verde.

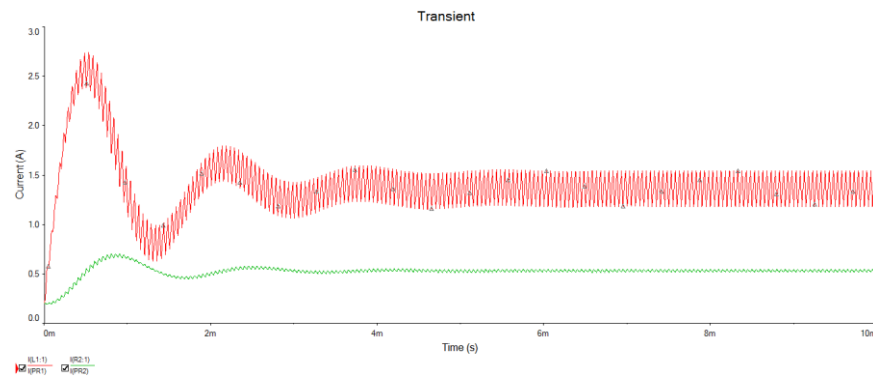


Figura 55 - Corrente na bobina (vermelho) e na carga (verde)

Este resultado permite confirmar que o valor pretendido na carga é assegurado e que é quase constante e que o conversor está no modo não lacunar. Ainda assim, ampliando a Figura 57 podemos confirmar os valores, através da Figura 55 .

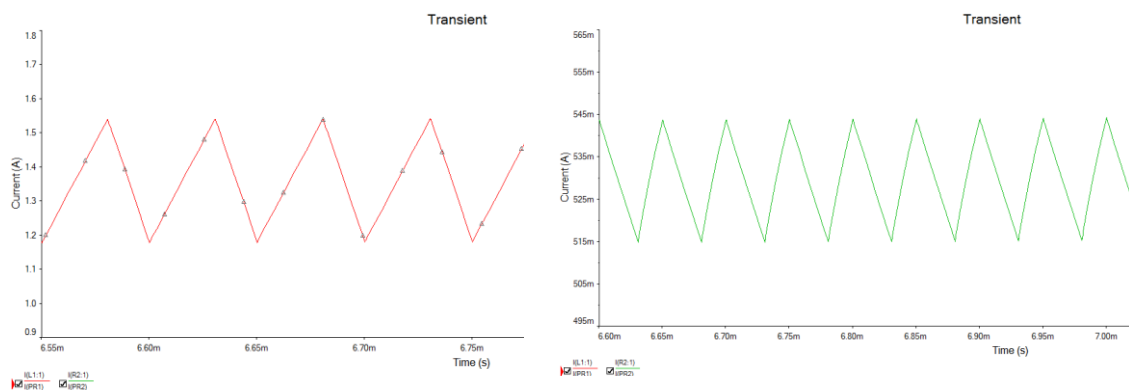


Figura 56 - Correntes na bobina (esquerda) e carga (direita) ampliadas

A simulação referente à tensão na carga é apresentada nas Figuras 58 e 59. Na Figura 58, a vermelho está também representado o sinal proveniente do circuito de controlo do conversor, que gera uma onda quadrada com uma determinada frequência e amplitude.

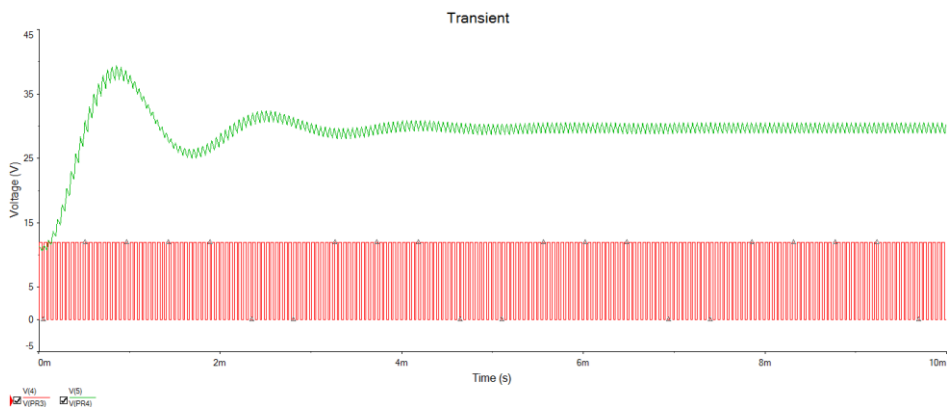


Figura 57 - Tensão na carga (verde) e sinal de controlo do conversor (vermelho)

Como se pode constatar, o valor mínimo desejado na carga do conversor é assegurado.

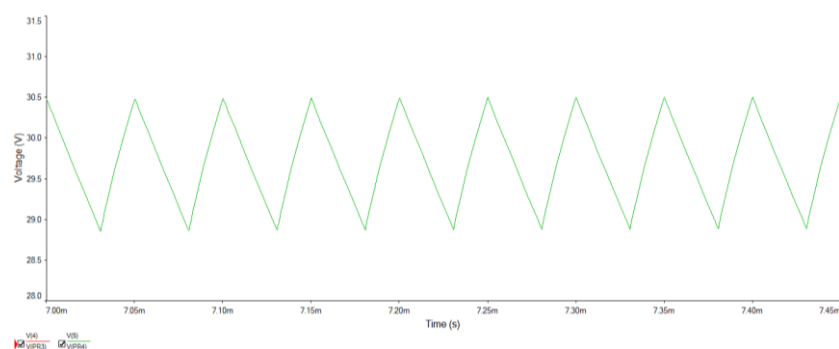


Figura 58 - Tensão na carga do conversor ampliada

Ao analisar-se a tensão no condensador, em vazio, obteve-se o seguinte resultado presente na Figura 60. Como nesta simulação não existe carga no conversor o esperado é que a tensão seja bastante elevada aos terminais deste componente, o que se verifica.

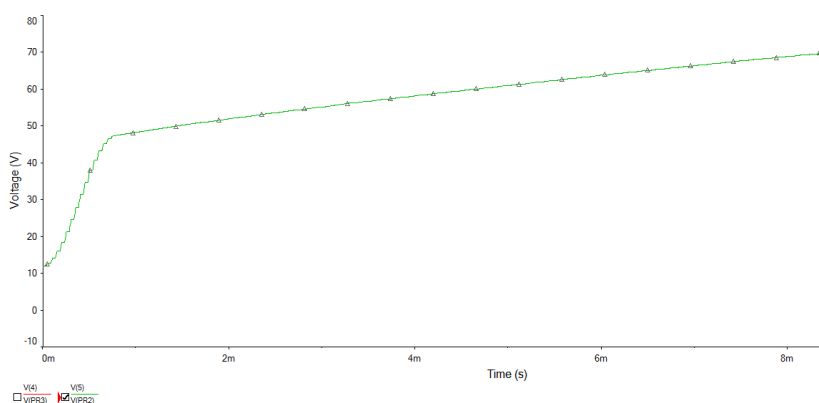
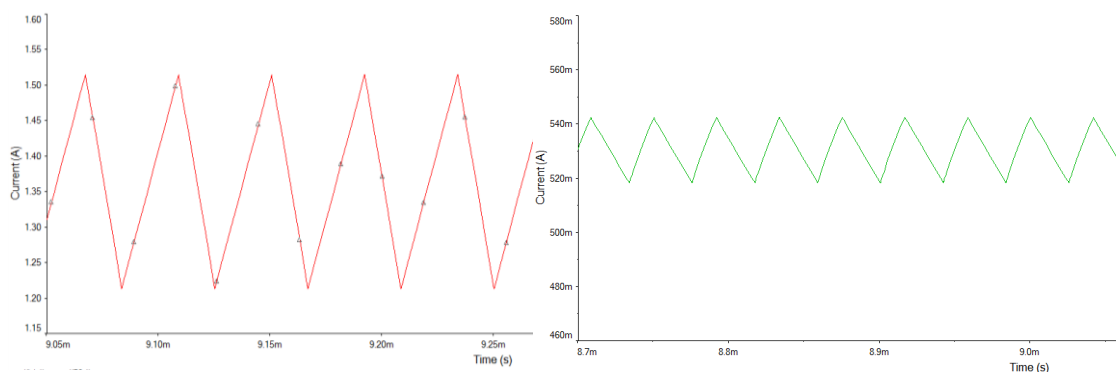


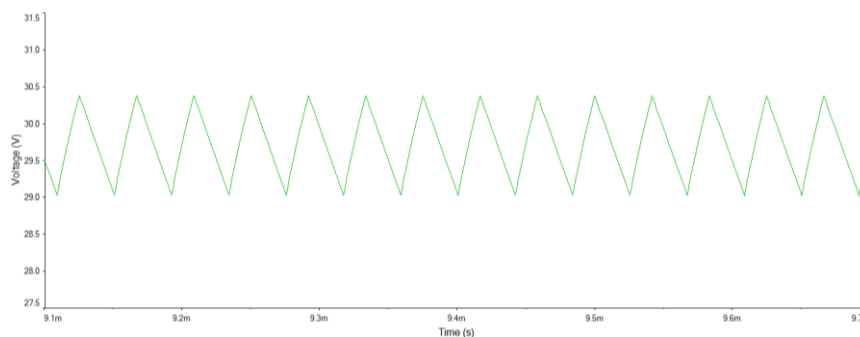
Figura 59 - Tensão no condensador quando o conversor não tem carga

No que diz respeito à variação da frequência, o conversor foi sujeito a uma variação de 20% da frequência para a qual foi dimensionado, ou seja seguidamente apresentamos os resultados obtidos para 16kHz e para 24kHz. Esta gama de valores é necessária para confirmar se o circuito apresenta o mesmo comportamento se ocorrerem alterações. Recordase que na prática os componentes não são ideais como apresentados nos simuladores, e podem ocorrer variações a nível da tensão de alimentação, o que interfere nas saídas. O aumento de temperatura que o próprio integrado sofre com o seu funcionamento também pode condicionar a saída, comprometendo os resultados.

Para 24kHz obteve-se os seguintes resultados expressos nas Figuras 61 e 62:



*Figura 60 - Corrente na bobina (esquerda) e na carga (direita) para 24kHz*



*Figura 61 - Tensão na carga para 24Hz*

Comparando os resultados obtidos de 24kHz com 20kHz não se encontram diferenças significativas, verificando-se que o conversor mantém o seu correto comportamento.

Seguidamente, as Figuras 63 e 64 mostram as características do conversor para 16kHz:



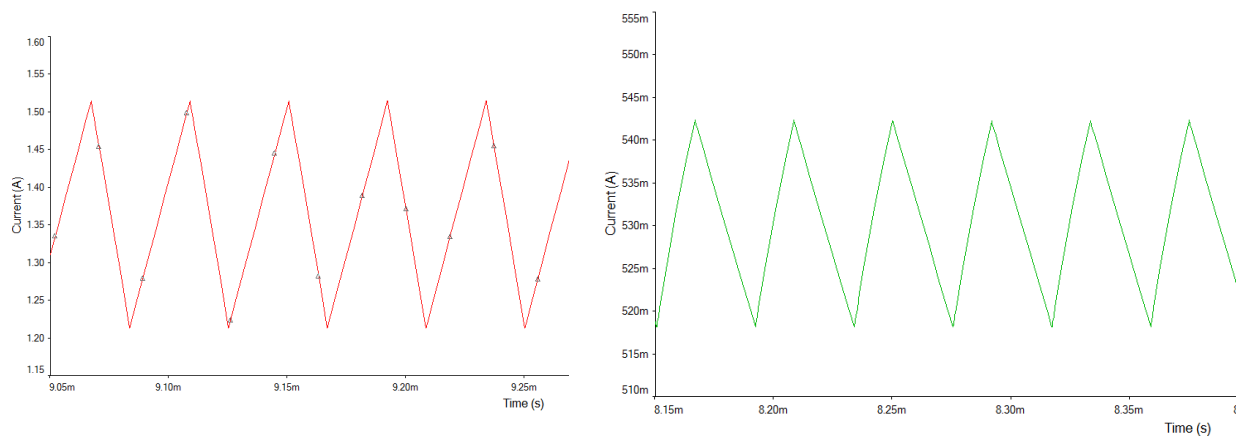


Figura 62 - Característica da corrente na bobina (esquerda) e na carga (direita) para 16kHz

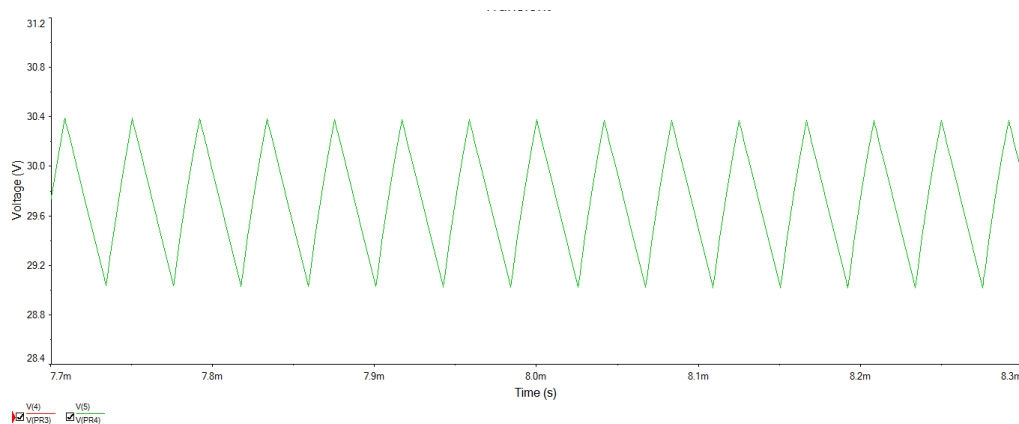


Figura 63 - Característica da tensão na carga para 16kHz

Pode-se novamente constatar que as características desejadas estão conservadas e o conversor funciona para  $20kHz \pm 20\%$ .

Como referido no capítulo anterior, foram consideradas três formas possíveis de se concretizar o controlador deste conversor, que se encontra representado por uma onda quadrada na Figura 55 na porta do transístor 1.

Existem circuitos integrados que, com o auxílio de componentes exteriores, conseguem regular a frequência e o ciclo de trabalho da onda de saída. As maiores vantagens identificadas na utilização destes circuitos são a tensão de alimentação, que muitas vezes não pode ser simétrica, e o seu custo. Como existem possibilidades mais simples e viáveis, esta hipótese foi excluída sendo a opção mais economicamente viável a utilização do multivibrador em modo astável. A montagem, que se encontra na Figura 66, foi dimensionada para gerar um impulso com 20kHz de frequência e um *duty-cycle* de 61%.

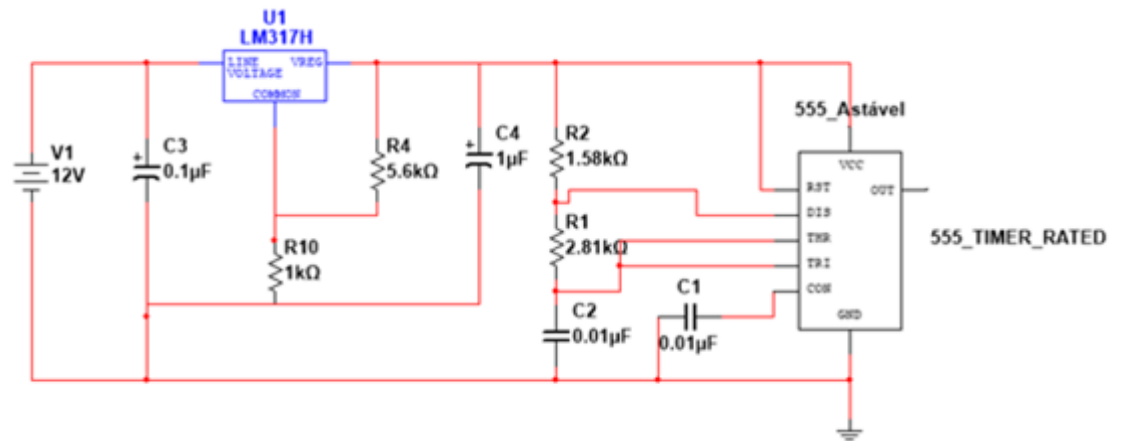


Figura 64 - Circuito gerador de uma onda quadrada

Com base no cálculo das expressões (24) e (25) é possível fazer o devido ajuste de  $R_2$ ,  $R_1$  e  $C_2$  com base na frequência,  $f$ , e no fator de ciclo,  $\delta$ , escolhidos.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_2 + 2R_1)C_2} \quad (24)$$

$$\delta = \frac{R_a + R_b}{R_a + 2R_b} \quad (25)$$

Apesar deste integrado poder ser alimentado com tensões desde 5 até 15V, optou-se por se usar a saída regulada do LM317. A saída do multivibrador encontra-se apresentada na Figura 66.

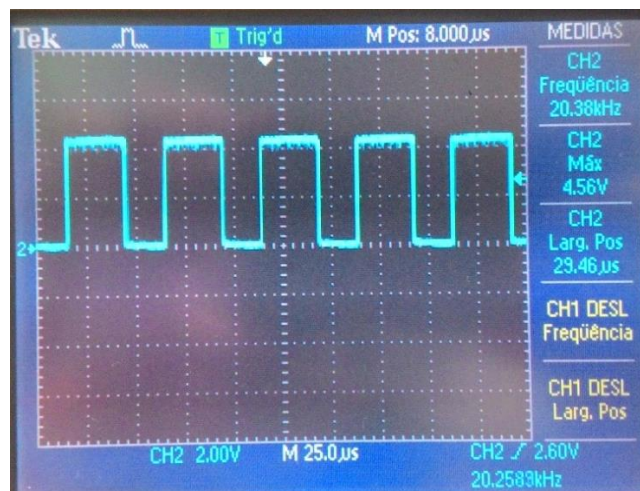


Figura 65 - Saída do multivibrador

A Figura 66 confirma que o multivibrador está a trabalhar na forma desejada. Porém, o impulso com 4.56V de amplitude, pode não ser suficiente para colocar o transístor 1 na região do trítodo, o que só acontece quando a tensão aplicada entre a porta e a fonte tem amplitude superior à tensão de limiar (4V). Para garantir que o transístor

entra no modo de funcionamento desejado foi necessário realizar um circuito auxiliar, habitualmente designado por deslocador de nível (level shifter), apresentado na Figura 67.

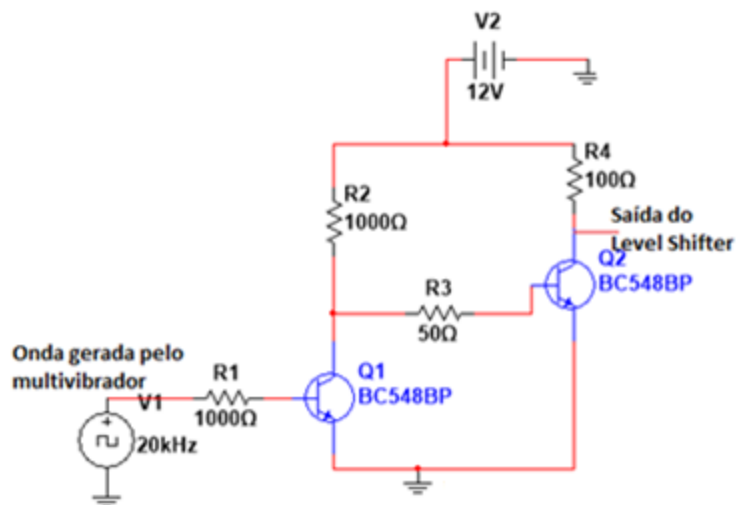


Figura 66 - Level shifter

O circuito proposto é de fácil compreensão. O sinal de entrada no transistor Q1 é uma onda quadrada com 4.5V de amplitude. Quando a base do transistor Q1 tiver 0V, o mesmo está ao corte, e o seu coletor apresenta 12V. O transistor 2 conduz, estando 0V no seu coletor. Quando a entrada do sistema apresentar 4.5V, o transistor Q1 conduz, o coletor de Q1 terá 0V, e como tal Q2 está ao corte, apresentando 12V no seu coletor. A saída do sistema é o coletor do transistor Q2, que varia entre 0 e 12V ao mesmo ritmo que o sinal de entrada.

Através da simulação do circuito da Figura 67 foi possível verificar-se que no coletor do transistor 2, o sinal apresentava as características expressas na Figura 68, estando a vermelho o sinal de saída do multivibrador e a verde o mesmo sinal, mas com uma amplitude superior.

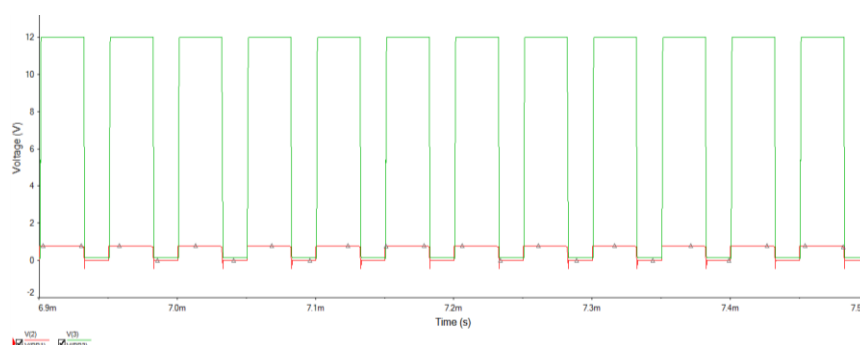


Figura 67 - Resultado da simulação do level shifter

Na prática, o resultado obtido encontra-se na Figura 69.

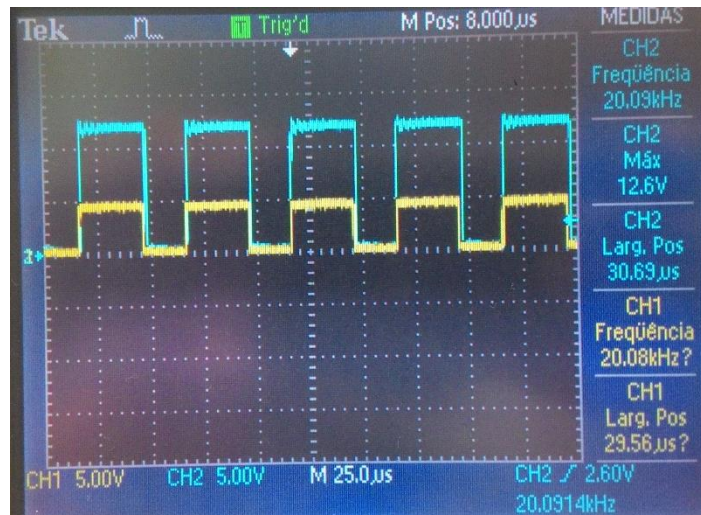


Figura 68 - Saída do level shifter (azul) e saída do multivibrador (amarelo)

Como se pode verificar, o sinal a azul, ou seja o sinal após o deslocador de nível, apresenta um *duty-cycle* ligeiramente diferente do estipulado, o que poderá ser facilmente verificado através da Tabela 25, onde são comparadas as frequências e os tempos em que a onda está no nível alto.

Tabela 25 - Comparação dos parâmetros do controlo do boost teóricos e práticos

Frequência Teórica	Frequência Prática	T <sub>on</sub> Teórico	T <sub>on</sub> Prático
20kHz	20.09kHz	30.5μs	30.69μs

Após explicado o circuito de controlo e o conversor, apresentam-se os resultados obtidos no sistema de acionamento da munição.

A Figura 70 mostra o sinal de saída do dreno do transístor 1 quando o sinal de controlo abordado acima é inserido na sua *gate*. Como se pode verificar, o transístor comuta com uma frequência próxima do valor para o qual foi dimensionado o conversor.

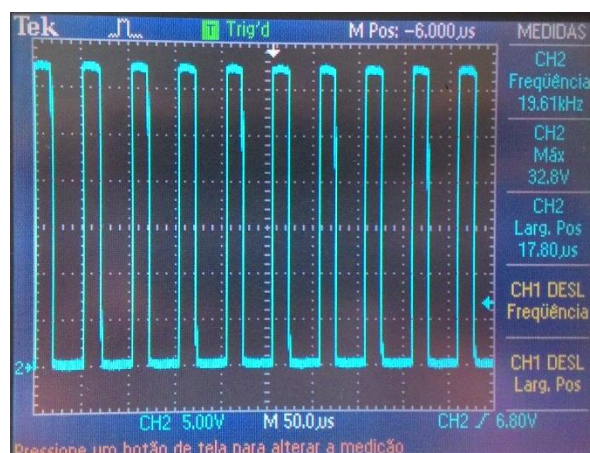


Figura 69 - Tensão no dreno do transístor 1 do conversor

A Figura 70 mostra a tensão no condensador quando o conversor não tem carga. Para se efetuar esta medição adicionou-se uma resistência de potência, de  $820\Omega$  para evitar que o condensador se danificasse. Pela Figura 71 podemos ainda constatar os ciclos de carga e descarga do condensador originados pela comutação do transístor do conversor.

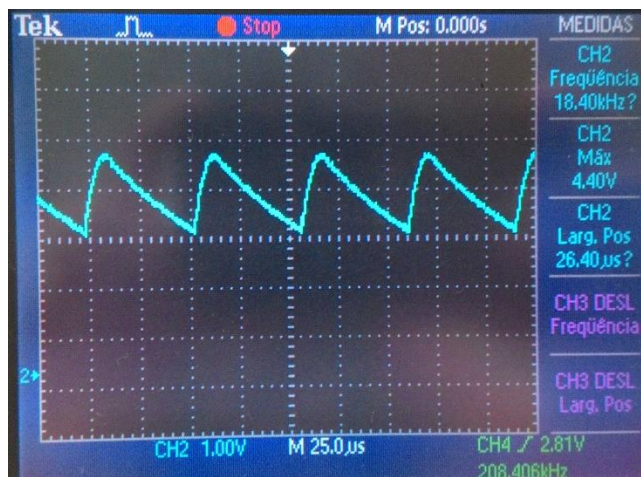


Figura 70 - Tensão no condensador (conversor sem carga), atenuação 10x

A Figura 72 diz respeito à tensão no dreno do transístor da carga quando este está ao corte. Como seria de esperar o valor de tensão obtido entre o dreno e source do transístor 2 é próximo do valor de tensão aos terminais do condensador.

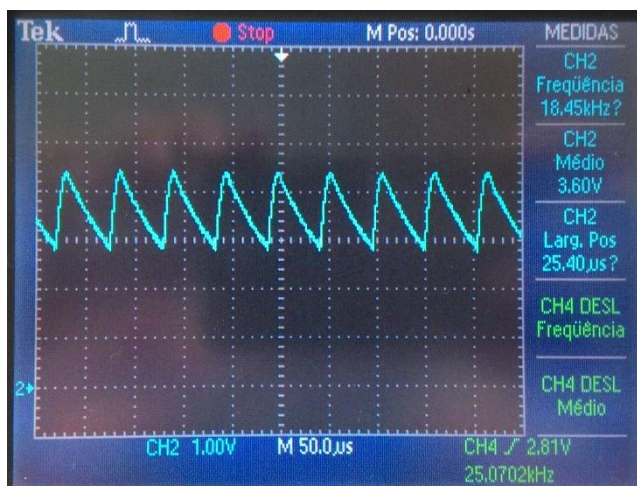


Figura 71 - Dreno do transístor da carga com 0V na gate, atenuação 10x

A Figura 73 mostra a azul a tensão de entrada do conversor, que corresponde à tensão da bateria de 12V, e a rosa, a tensão que se obtém na carga do conversor, que apresenta um valor médio próximo de 36V. Esta figura permite concluir que o conversor funciona correctamente e permite obter um valor de tensão de saída superior ao de entrada.



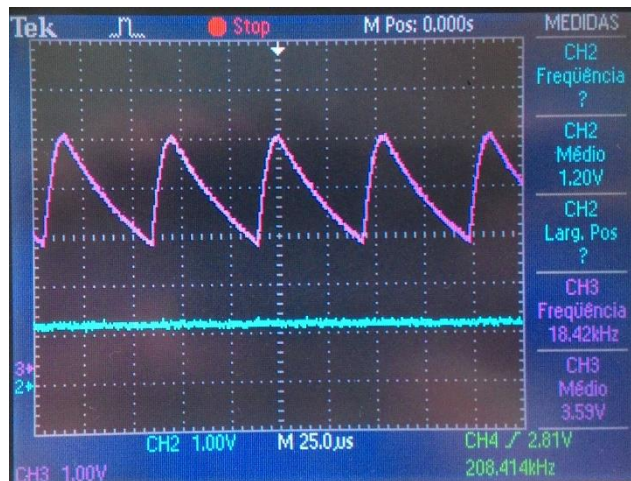


Figura 72 - Tensão de entrada do conversor (azul) e tensão na carga do conversor (rosa), atenuação 10x

Na Figura 55, no esquema elétrico do conversor dimensionado, a carga é constituída por uma resistência em série com um transistor. Esse transistor, quando receber um sinal adequado na sua *gate* irá entrar em condução e permitirá a libertação da energia armazenada. A Figura 74 mostra o dreno do transistor 2, a azul, quando recebe na *gate* 0V, e a verde um sinal, obtido através do gerador de funções que permitirá verificar o comportamento do transistor e a sua estabilidade através da variação do sinal de entrada.

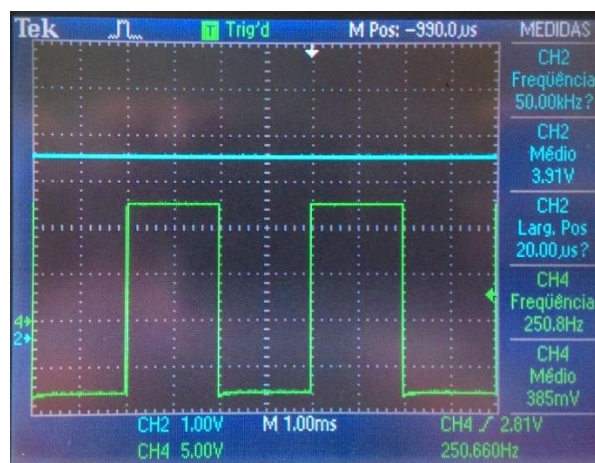


Figura 73 - Tensão no dreno do transistor da carga do conversor (azul) e sinal de controlo do transistor (verde), atenuação 10x

Nas Figuras 75, 76, 77, 78 e 79 podemos observar a saída do dreno do transistor 2 quando este recebe na *gate* o sinal a verde com diferentes valores de frequência.

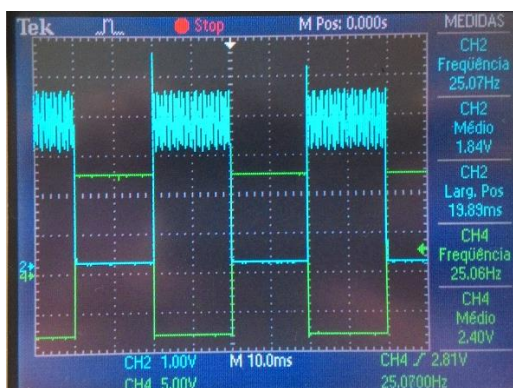


Figura 74 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25Hz (verde), atenuação 10x

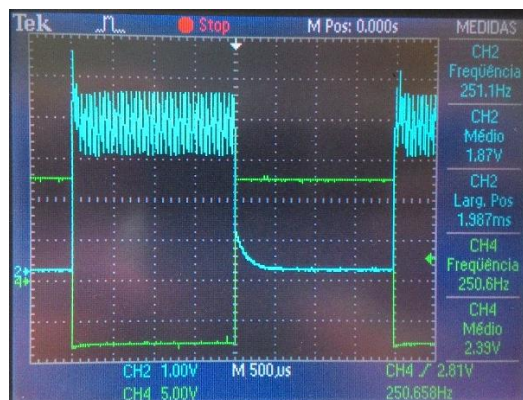


Figura 75 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 250Hz (verde), atenuação 10x

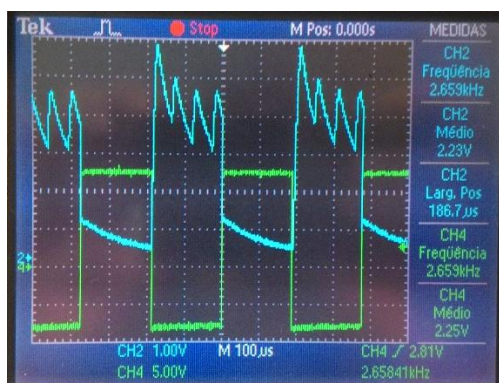


Figura 76 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 2.5kHz (verde), atenuação 10x



Figura 77 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25kHz (verde), atenuação 10x

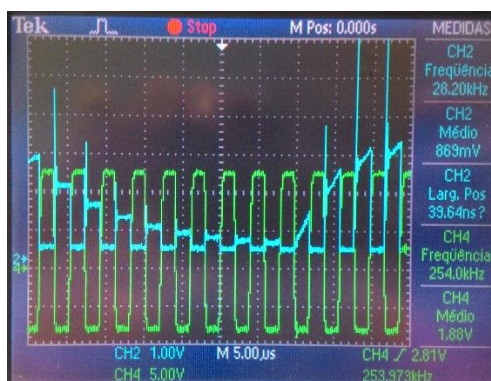


Figura 78 - Dreno do transistor 2 (azul) e sinal de entrada com 25Hz (verde), atenuação 10x

Como se pode constatar, para frequências na ordem dos kHz o sinal do dreno do transistor deixa de ser regular. Caso o sinal da *gate* do transistor 2 apresente valores de frequências inferiores obtemos um sinal adequado no dreno. Nas Figuras 75 e 76 visualiza-se perfeitamente que quando o transistor está ao corte, isto é, quando o sinal da *gate* toma o valor de 0V, a saída coincide com o já mostrado anteriormente, sendo o *ripple* de tensão facilmente observado, e que quando o transistor entra em condução, o valor da tensão decresce, dado que o condensador do conversor descarrega a energia acumulada.

Enquanto o transistor 2 conduzia foi medido o valor da tensão aos terminais da resistência de 68Ω, obtendo-se 25,9V, ou seja, uma corrente de 0,38A. Como estes valores

não são suficientes optou-se por reajustar o conversor como será explicado adiante. É importante também referir que quando o transistor 2 está ao corte, a corrente em R2 é nula.

Para se conseguir obter um melhor resultado face ao referido até então decidiu-se aumentar o fator de ciclo para 70%, aumentar ligeiramente o valor do condensador do conversor e reduzir a carga, estando o circuito expresso na Figura 80.

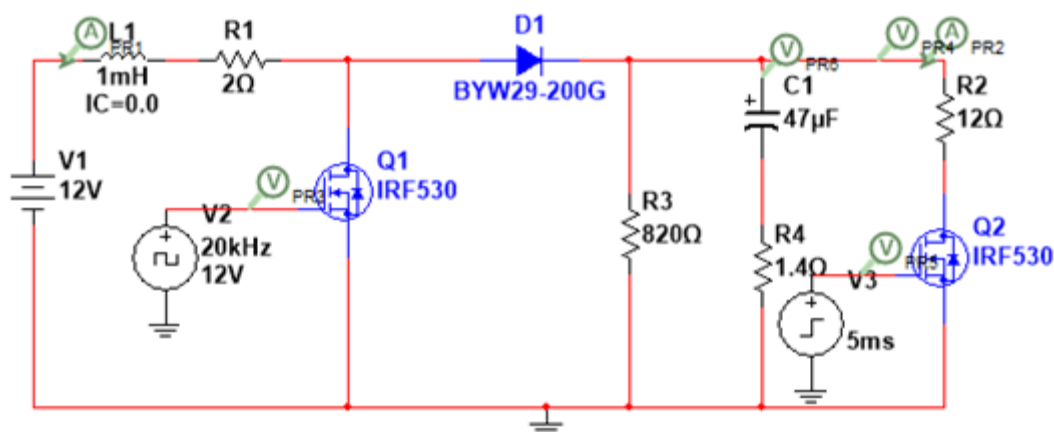


Figura 79 - Circuito alterado do conversor elevador

O circuito de controlo, após as referidas alterações, funciona de acordo com o esperado. Para uma frequência de 20kHz e fator de ciclo de 70%, espera-se que o impulso tenha 35μs de duração no nível alto, tendo-se obtido 35,61μs. O level shifter deve preservar as características da onda de saída do multivibrador. Os resultados encontram-se nas Figuras 81 e 82.

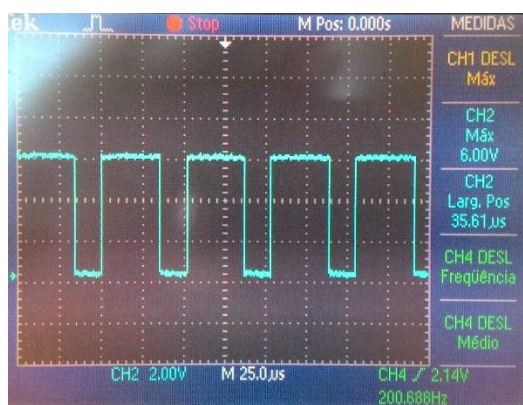


Figura 80 - Saída do multivibrador, 20kHz e 70% de fator de ciclo

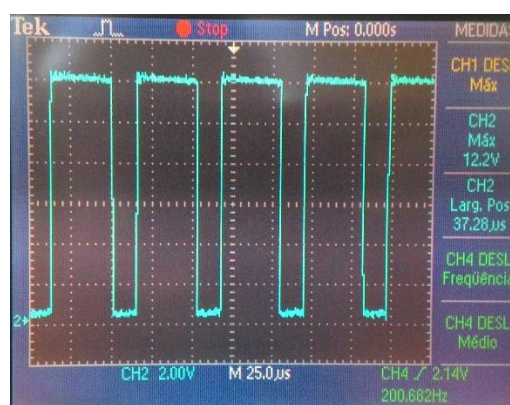


Figura 81 - Saída do level shifter com entrada de 20KHz e fator de ciclo de 70%

Quando o sinal da Figura 82 é colocado na *gate* do transistor 1 do conversor obtém-se o resultado expresso na Figura 83. Verifica-se que o transistor funciona corretamente e que o sinal no dreno do transistor não apresenta distorções.



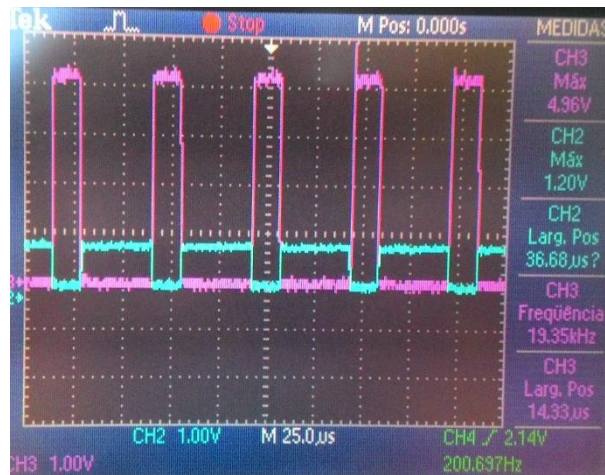


Figura 82 - Gate do transistor 1 (azul), dreno do transistor 1 (rosa), atenuação 10x

Através da comparação da Figura 70 com a Figura 83 podemos concluir de imediato que, com as alterações introduzidas no conversor, a tensão no dreno do transistor 1 apresenta uma amplitude superior ao verificado anteriormente.

A Figura 84 mostra a tensão aos terminais do condensador quando o transistor da carga está ao corte.

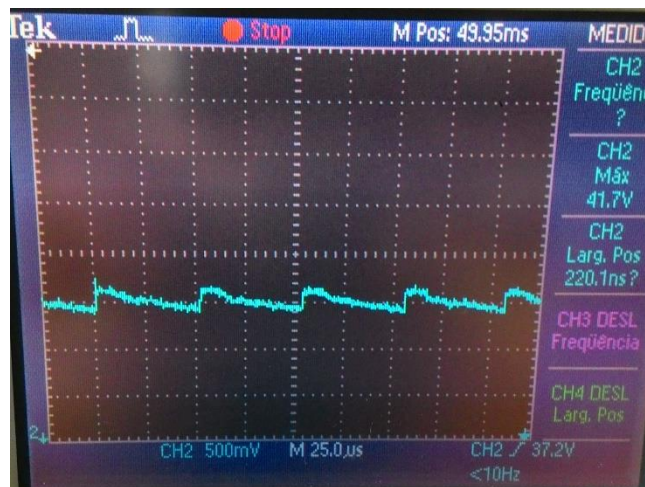


Figura 83 - Tensão no condensador do conversor

Na Figura 85 é mostrada novamente a tensão no transistor 2 quando o sinal que recebe na *gate* varia entre dois níveis. Podemos concluir que o sistema comporta-se corretamente, verificando-se que quando a tensão na *gate* é nula, o transistor apresenta uma tensão dreno-source coincidente com a tensão do condensador do conversor, enquanto que quando o sinal da *gate* está no nível alto, observamos a descarga e a estabilização da tensão.

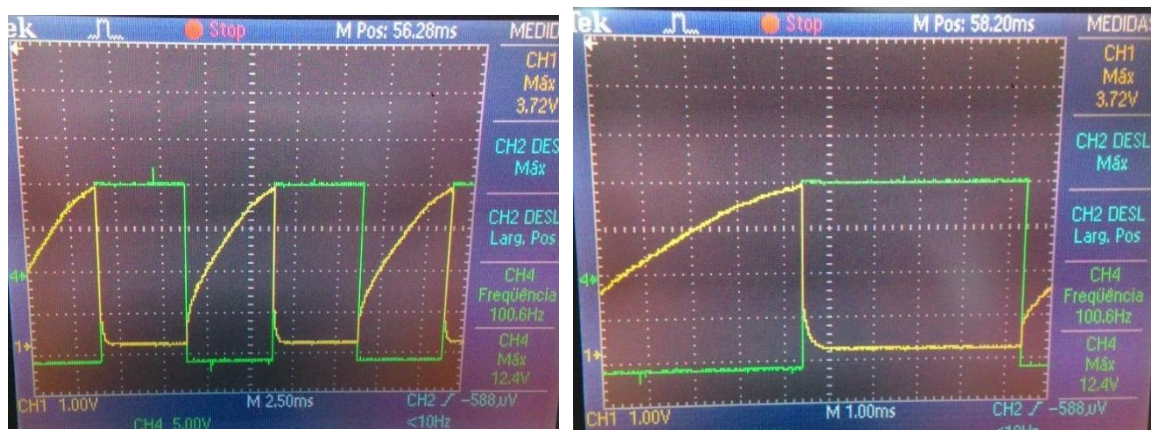


Figura 84 - Tensão no dreno do transistor da carga do conversor (amarelo) e tensão na gate do mesmo (verde)

Ao medir-se a tensão aos terminais da resistência da carga, quando a *gate* do transistor 2 recebia um sinal não nulo, obteve-se aproximadamente 6V. Dado que a resistência tem  $12\Omega$ , aplicando a lei de ohm verifica-se que esta era atravessada por 0.5A, cumprindo os requisitos inicialmente estipulados.

Em anexo poderá ser consultado o circuito completo referente aos blocos destinados ao acionamento da munição do Projeto FIREND, bem como algumas especificações complementares dos componentes utilizados.

### 3.4 Análise de custos

Como foi referido nos parâmetros do projeto, para que este seja exequível deve também ser economicamente viável. Assim, foi feita uma análise de custos com base nos componentes utilizados, a fim de se estimar o custo desta parte da espoleta. A Tabela 26 indica o preço dos componentes que se consideraram mais adequados para integrarem o projeto, estando contabilizado ainda a quantidade em que foram usados. A Tabela 27 faz referência aos componentes passivos e não faz distinção entre o tipo de condensadores utilizados, isto é não se especificou se se tratava de condensadores eletrolíticos, cerâmicos ou de poliéster.

Ainda nas Tabelas 26 e 27 é apresentado o custo unitário dos materiais usados e o custo do mesmo material caso seja comprado em lotes de pelo menos 1000 unidades segundo o *site* da Farnell.

*Tabela 26 - Análise de custo (integrados)*

Grupo	Energia					Sensores				Acionamento			CUSTO NO PROJETO
Integrados	TLE2426	LM317	LM7805	Pilha 9V	Pilha 12 V	ADXL327	LM324	LM556	NE555	NE555	BC549	IRF530	
Quant.	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	-
Custo 1 unidade (€)	1.55	0.54	0.773	14.46	3.35	7.69	0.41	1.21	0.19	0.19	0.29	1.74	<b>49.29</b>
Custo 1 unidade (+1000) (€)	0.706	0.275	0.353	13.15	2.55	3.15	0.135	0.587	0.102	0.102	0.0663	0.431	<b>35.39</b>

Tabela 27 - Análise de custo (componentes passivos)

	Componentes Passivos				CUSTO NO PROJETO
	Resistências	Condensadores	Bobinas	Diodos	
Quant.	45	26	1	1	-
Custo 1 unidade (€)	0.10	0.30	0.89	0.706	<b>13.90</b>
Custo 1 unidade (+1000) (€)	0.04	0.10	0.53	0.617	<b>5.55</b>

Com os valores das tabelas referidas podemos verificar que o custo dos materiais para se produzir apenas a parte aqui desenvolvida da espoleta ronda os €63, enquanto para produção em grande escala o custo pode ser ligeiramente reduzido, apresentando €40 de custo. Torna-se importante salientar que o valor aqui apresentado não inclui o custo da mão-de-obra associada nem os custos associados ao desenvolvimento de uma placa com o circuito impresso, estando apenas aqui discriminado o custo dos materiais. Como tal, os valores aqui apresentados são inferiores ao custo verdadeiro que a espoleta apresenta.

## 4. Funcionamento Global do Circuito

Neste capítulo procura-se fazer a interligação entre todos os blocos constituintes da espoleta, apresentando os resultados obtidos com a ligação dos sistemas acima especificados com os restantes circuitos constituintes da espoleta.

O comportamento global do sistema, que se encontra esquematizado na Figura 86, foi testado para o eixo principal do acelerómetro.

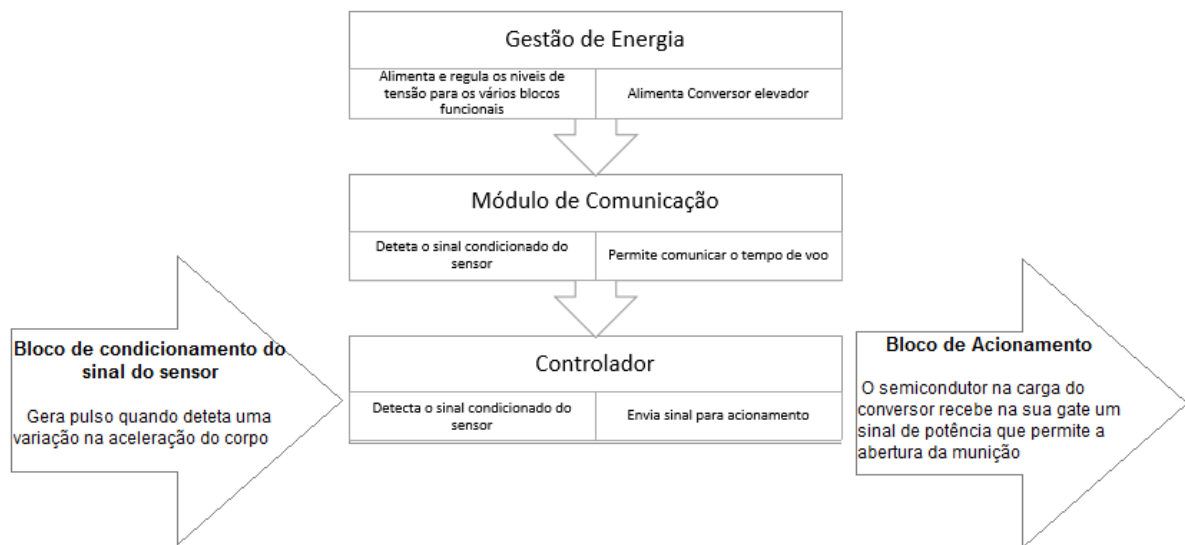


Figura 85 - Comportamento global do sistema

Na Figura 87 é apresentado, a azul, o sinal condicionado de um dos eixos do acelerómetro, a rosa, o sinal do controlador que indica que houve uma detecção do movimento e a amarelo, o sinal do controlador que atua na *gate* do semiconductor na carga do conversor. Neste caso pretendia-se verificar o comportamento do sistema quando se cancelava o lançamento da munição, permitindo manusear novamente a munição, não armada, em segurança. Como se pode constatar, mesmo que o sinal proveniente do bloco do sensor fosse suficiente para começar a contagem do tempo, a mesma não era iniciada.



Figura 86 - Simulação do cancelamento da activação da munição

A Figura 88 mostra o comportamento no sinal de saída do controlador ao detetar um impulso. Como se verifica, o sinal condicionado do sensor gera uma variação de amplitude, o que leva o controlador a reagir em menos de 2.5ms, iniciando então a contagem do tempo.

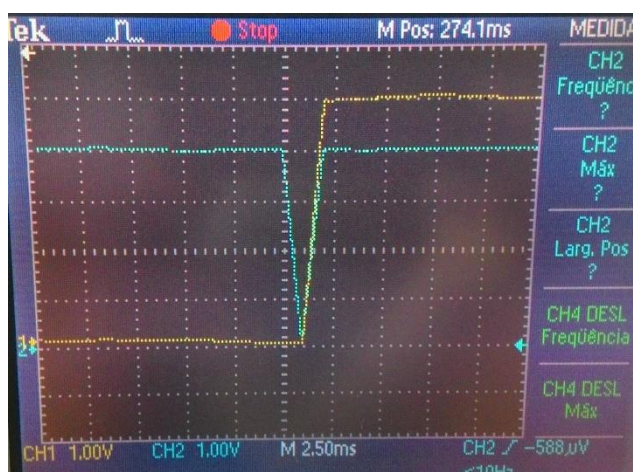


Figura 87 - Comportamento do controlador ao detetar um impulso

Na Figura 89 pode observar-se a azul a deteção do movimento pelo controlador e a amarelo a tensão no dreno do transístor da carga do conversor. Para este caso o tempo de voo foi programado para 2s de voo. Analisando o tempo decorrente desde a deteção do movimento (azul) até à introdução do sinal na *gate* do transístor (amarelo) confirma-se que o parâmetro foi respeitado.





Figura 88 - Dreno do transístor da carga do conversor (amarelo) e sinal que indica a detecção do movimento (azul)

Os resultados obtidos do funcionamento do sistema são positivos, pois estão de acordo com o que era expectável, funcionando correctamente.





# 5. Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros

## 2.1. Conclusões

O objetivo da presente dissertação consistiu no projeto de um sistema de gestão de energia e activação da espoleta da munição do Projeto FIREND®.

No âmbito de se contextualizar o tema, começou-se por referir a necessidade e a importância que um projétil de combate a incêndios florestais tem por permitir a utilização com visibilidade reduzida e por conseguir aceder locais inacessíveis com outros meios. O potencial deste projeto aumenta se considerarmos que este projétil pode ser empregue em vários ambientes, e não só a nível nacional. Destaca-se ainda a iniciativa por parte do Exército, dado que os projetos que visem a melhoria da qualidade de vida da população devem ser valorizados.

O projeto da espoleta da munição foi dividido em vários grupos: o grupo dotado de um sensor que é o responsável pela deteção do movimento de saída do tubo do obus da munição, o responsável por fornecer todas as necessidades energéticas do projeto, o que permite o acionamento da munição, o constituído pelo microcontrolador, que interage com todos os grupos e é responsável pela contabilização do tempo de voo, e por último o grupo que permite a comunicação entre o municionador do obus e a munição. O presente trabalho foca-se nos três primeiros grupos.

O circuito proposto para o bloco que condiciona o sinal proveniente dos eixos do sensor envolve um acelerómetro de três eixos que gera sinais perante a variação da aceleração do corpo. O seu sinal é de seguida condicionado para um filtro com frequência de corte de 1KHz, para impedir o acionamento involuntário. A saída do filtro é amplificada, e quando o sinal for suficientemente forte irá gerar um impulso, através de um multivibrador, que será enviado para o controlador, que deverá então iniciar a contagem do tempo de voo.

O circuito que fornece a alimentação do conjunto é constituído por um dispositivo que cria uma referência a *ground* e adapta o nível de tensão da bateria, 9V, para dois níveis distintos, 4,5V e 3V, o que abanje os valores necessários de todos os integrados. Para o acionamento foi empregue uma pilha de 12V.

Dado que o projeto não impunha nenhuma forma específica de se conseguir o acionamento, optou-se por se desenvolver um conversor dc-dc elevador bem como o seu circuito de controlo, onde se destaca a carga do conversor que era constituída não só por uma resistência como também por um transistor, o que permitia que a descarga da energia acumulada fosse apenas quando o transistor recebesse o sinal adequado na sua *gate*. O sinal de activação é proveniente do controlador.

## 2.2. Propostas de trabalhos futuros

Devido a todos os investimentos feitos ao longo dos anos e às vantagens que este projeto pode proporcionar no combate a incêndios é importante garantir a continuidade do mesmo. Assim, reuniu-se algumas questões que surgiram ao longo das várias etapas aqui explanadas que não foram devidamente abordadas mas que certamente contribuirão para melhorar a eficácia do Projeto FIREND.

Propõe-se como trabalhos futuros:

- Testar os limites do acelerómetro em situações extremas, por exemplo através de uma centrífugadora;
- Testar acelerómetros que registem frequências baixas, isto é inferiores a 1Hz;
- De forma a assegurar a redundância criar um sistema de acionamento alternativo, com funcionamento semelhante ao dos *airbags* ou através da aplicação de sensores de choque;
- Projetar e construir uma placa com o circuito impresso;
- Reduzir os custos totais do sistema.

# Referências

- [1] “Incendios Florestais na Rede Nacional de Áreas Protegidas em 2013,” 4 Outubro 2014. [Online]. Available: <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/Resource/doc/rel/2013/relatorio-dfci-ap-2013>.
- [2] Constituição da Republica Portuguesa Artº275,numero 6, “[https://www2.uab.pt/guiainformativo/docs/lcs\\_regras\\_biblio\\_estagio.pdf](https://www2.uab.pt/guiainformativo/docs/lcs_regras_biblio_estagio.pdf),” 16 Dezembro 2014. [Online].
- [3] “Conceito Estratégico de Defesa Nacional,” 2003. [Online]. Available: [http://www.fd.uc.pt/CI/CEE/OI/NATO/Conceito\\_estrategico\\_defesa\\_PT-2003.htm](http://www.fd.uc.pt/CI/CEE/OI/NATO/Conceito_estrategico_defesa_PT-2003.htm). [Acedido em 16 Dezembro 2014].
- [4] 15 Setembro 2009. [Online]. Available: <http://www.emgfa.pt/documents/4xcs0fzgnm8h.pdf>. [Acedido em 16 Dezembro 2014].
- [5] [Online]. Available: <http://www.defesa.pt/Paginas/Exercitonaprevencaoecombateaosfogosflorestais.aspx>. [Acedido em 4 Outubro 2014].
- [6] J. Calado, Projecto de um Projétil de calibre 155mm para combate a incendios, Instituto Superior Tecnico, 2013.
- [7] Ó. M. C. d. Miranda, *Sistema de detecção de posição*, Lisboa: Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, 2013.
- [8] 18 Dezembro 2013. [Online]. Available: <http://mundodasarmas12.blogspot.pt/2013/12/espoleta.html>. [Acedido em 18 Outubro 2014].
- [9] [Online]. Available: <http://www.eugeneleeslover.com/USNAVY/CHAPTER-3-4.html>. [Acedido em 25 Novembro 2014].
- [10] 24 Julho 2014. [Online]. Available: [http://www.navweaps.com/Weapons/Gun\\_Data\\_p2.htm](http://www.navweaps.com/Weapons/Gun_Data_p2.htm). [Acedido em 25 Novembro 2014].
- [11] L. H. B, “Point detonating fuze”. US Patente US2808000 A, 1957.
- [12] [Online]. Available: [http://uxoinfo.com/blogcfc/client/includes/uxopages/Mulvaney\\_Details.cfm?Ord\\_Id=PF14](http://uxoinfo.com/blogcfc/client/includes/uxopages/Mulvaney_Details.cfm?Ord_Id=PF14). [Acedido em 24 Novembro 2014].
- [13] J. J. A. K. T. J. S. A. M. E. L. T. D. McCARSON, “NEW CONCEPT FIREFIGHTING,” AIR FORCE ENGINEERING & SERVICES CENTER ENGINEERING & SERVICES LABORATORY TYNDALL AIR FORCE BASE, Florida, Maio 1992.
- [14] J. M. O'Dwyer, “Projectile launching apparatus and methods for fire fighting”. US Patente US6860187 B2, 2005.

- [15] R. V. Vinayagamurthy Sridharan, "Fire extinguishing by explosive pulverisation of projectile based frozen gases and compacted solid extinguishing agents". US Patente US7478680 B2, 2009.
- [16] R. Pavesi, "Silent responder fire fighting systems". US Patente US20120061109 A1, 2012.
- [17] O. Miranda, Sistema de Detecção de Posição, : Instituto Superior Tecnico, 2013.
- [18] A. R. G. G. S. L. e. R. P. Lígia J. Figueiredo, "Aplicações de acelerómetros," , Lisboa, Dezembro 2007.
- [19] B. H. C. B. Marc Dennis, AN-761 Electronic Fuzing, USA: Texas Instruments, 1991.
- [20] AnalogDevices, Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 16$  g Accelerometer, USA: ADXL 236 Data Sheet, 2009.
- [21] I. A. G. NATO, "FINAL REPORT OF NIAG SG.89 STUDY ON FUTURE FUZING TECHNOLOGIES FOR GROUND TARGETS," NATO, UE, Maio 2006.
- [22] L. Nappert, "An exploding foil initiator system," Minister of National Defense, Canadá, 1995.
- [23] Simon Bower , Brian M Coaker, "Recent developments in Exploding Foil Initiator (EFI) based electronic safety, arming and initiation systems".
- [24] CoreLab, "Electric Initiation Device - RF Safe Exploding Bridgewire Detonators & Igniters," Owen Oil Tools, , 2007.
- [25] TitanSpecialies, "Electric Detonators Used in Wireline Operations," Texas, 2007.
- [26] S. F. S. Gianna S. Strohm, "Performance Characterization of Nanoscale Energetic Materials on Semiconductor Bridges (SCBs)," 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Florida, 2010.
- [27] 2014. [Online]. Available: <http://www.eba-d.com/products/semiconductor-bridge-scb-initiator/>. [Acedido em 22 Dezembro 2014].
- [28] J. ' . E. K. A. T. C. S. L. J. E. Kennedy, "DIRECT LASER INITIATION OF PETN," Los alamos national laboratory, USA, 2001.
- [29] V. L. Bueno, Obtenção de composto cerâmica-polímero pelo processo de co-extrusão para aplicações piezoelétricas, Porto Alegre: Universidade federal de rio grande do sul, 2009.
- [30] L. Fernando, Materiais piezoelétricos, Marabá: Universidade federal do Pará, 2013.
- [31] "PROJETOS DO GRUPO DE MATERIAIS (IPqM-15)," [Online]. Available: <https://www.mar.mil.br/ipqm/v.1.0.0/paginas/materiais.htm>. [Acedido em 22 Dezembro 2014].
- [32] NATO, "Final report of NIAG SG.89 study on future fuzing technologies for ground targets," 2006.
- [33] "Battery University," [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery). [Acedido em 4 Fevereiro 2015].

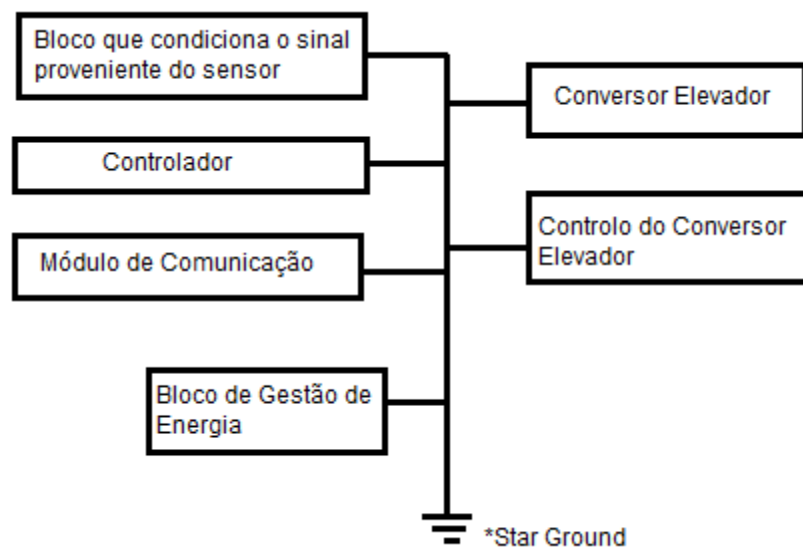
[34] "GlobTek.Ink," [Online]. Available: <http://br.globtek.com/lithium-polymer-battery-packs/>. [Acedido em 2015 Fevereiro 3].

S. e. T. Aplicada, "Manual de Baterias Recerregáveis, Pilhas e Carregadores," [Online]. [35] Available: <http://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/manual.pdf>. [Acedido em 2015 Setembro 1].

A. Device, "ADI Univerty Program MEMS Workshop," Fvereiro 2012. [Online]. Available: [36] <http://www.eet-china.com/IMAGES/ADI2012wintercampref1.pdf>. [Acedido em 25 Agosto 2015].







*Figura 90 - Star Ground*



# Anexo 2

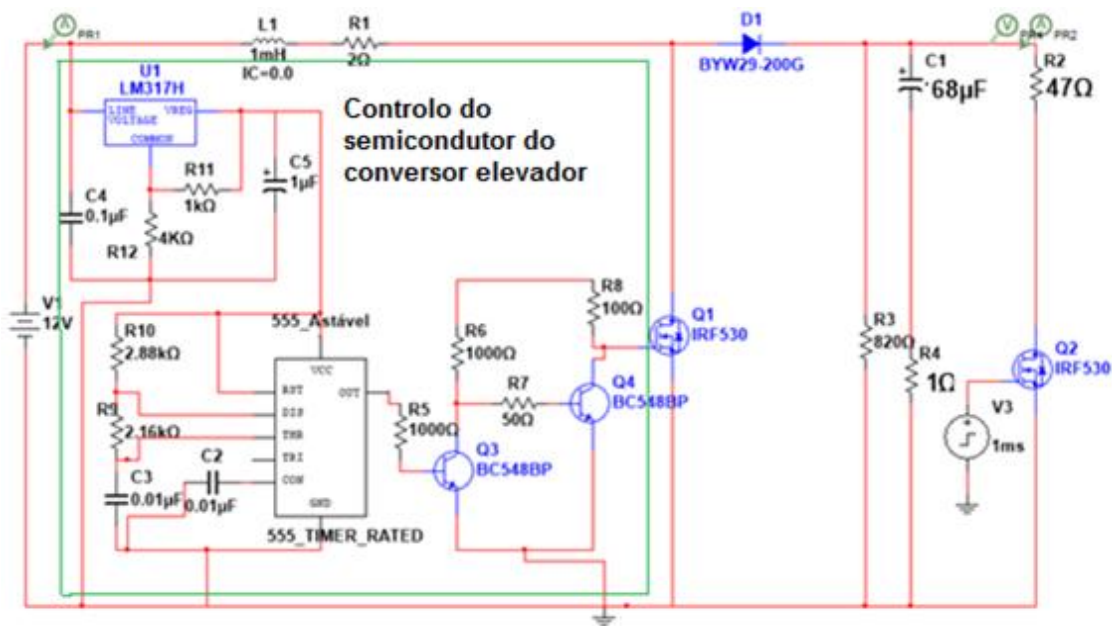


Figura 91 - Circuito completo do sistema de acionamento e controlo do semiconductor do conversor

Tabela 30 - Dados referentes aos condensadores usados no grupo de acionamento

Condensadores		
Designação	Capacidade	Tensão Máxima
C1	68 $\mu$ F	63V
C2	0.01 $\mu$ F	400V
C3	0.01 $\mu$ F	400V
C4	0.1 $\mu$ F	100V
C5	1 $\mu$ F	63V

Tabela 31 - Dados referentes às resistências usadas no grupo de acionamento

Resistências			
Designação	Valor	Tolerância	Potência
R2	47 $\Omega$	10%	10W
R3	820 $\Omega$	10%	10W
R5	1000 $\Omega$	$\pm$ 5%	0.25W
R6	1000 $\Omega$	$\pm$ 5%	0.25W
R7	50 $\Omega$	$\pm$ 5%	0.25W
R8	100 $\Omega$	$\pm$ 5%	0.25W

R9	2160 $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R10	2880 $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R11	1000 $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R12	4000 $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W

## Anexo 3

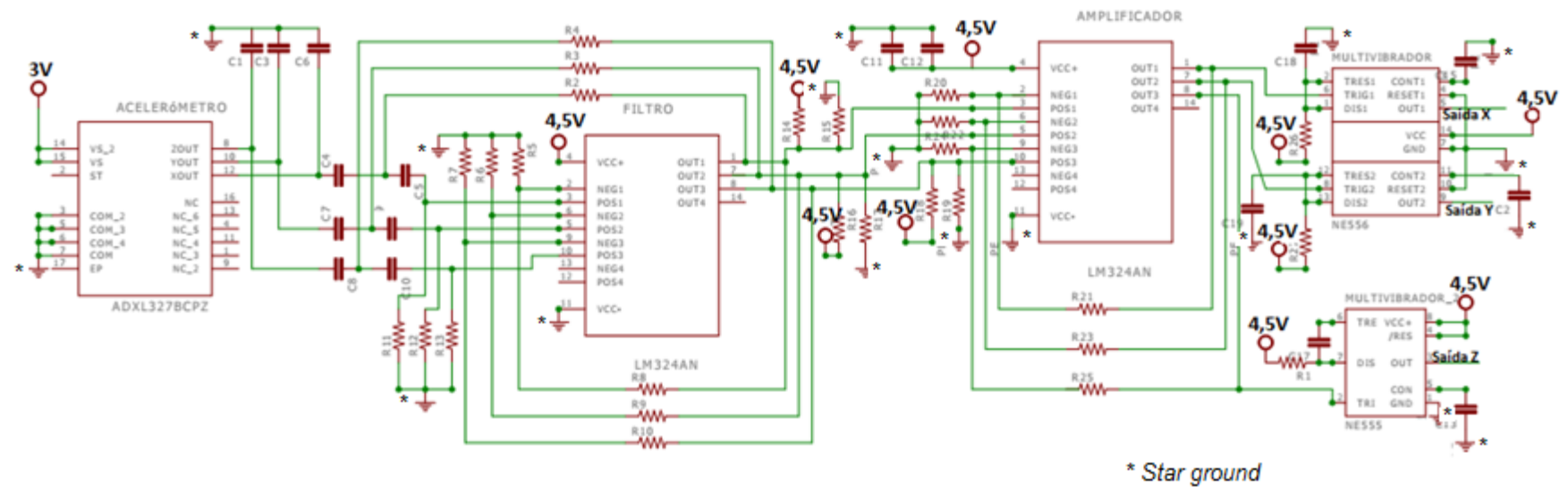


Figura 92 - Circuito completo do bloco de condicionamento do sinal dos eixos do acelerómetro

Tabela 32 - Dados referentes aos condensadores usados no grupo sensores

Condensadores		
Designação	Capacidade	Tensão Máxima
C1	0.01 $\mu$ F	400V
C2	0.1 $\mu$ F	400V
C3	0.01 $\mu$ F	400V
C4	0.01 $\mu$ F	400V
C5	0.01 $\mu$ F	400V
C6	0.01 $\mu$ F	400V
C7	0.01 $\mu$ F	400V
C8	0.01 $\mu$ F	400V
C9	0.01 $\mu$ F	400V
C10	0.01 $\mu$ F	400V
C11	0.1 $\mu$ F	400V
C12	1 $\mu$ F	250V
C13	0.1 $\mu$ F	400V
C15	0.1 $\mu$ F	400V
C17	0.01 $\mu$ F	400V
C18	0.01 $\mu$ F	400V
C19	0.01 $\mu$ F	400V

Tabela 33 - Dados referentes às resistências usadas no grupo sensores

Resistências			
Designação	Valor	Tolerância	Potência
R1	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R2	16 k $\Omega$	10%	0.25W
R3	16 k $\Omega$	10%	0.25W
R4	16 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R5	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R6	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R7	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R8	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R9	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R10	2 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R11	16 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R12	16 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W

R13	16 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R14	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R15	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R16	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R17	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R18	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R19	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R20	13 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R21	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R22	13 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R23	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R24	13 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R25	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R26	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W
R27	100 k $\Omega$	$\pm 5\%$	0.25W